

PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 2001-085796

(43)Date of publication of application : 30.03.2001

(51)Int.Cl.

H01S 5/343

G11B 7/125

(21)Application number : 2000-205787

(71)Applicant : SHARP CORP

(22)Date of filing : 06.07.2000

(72)Inventor : ITO SHIGETOSHI
YAMAZAKI YUKIO
TANETANI MOTOTAKA

(30)Priority

Priority number : 11195390

Priority date : 09.07.1999

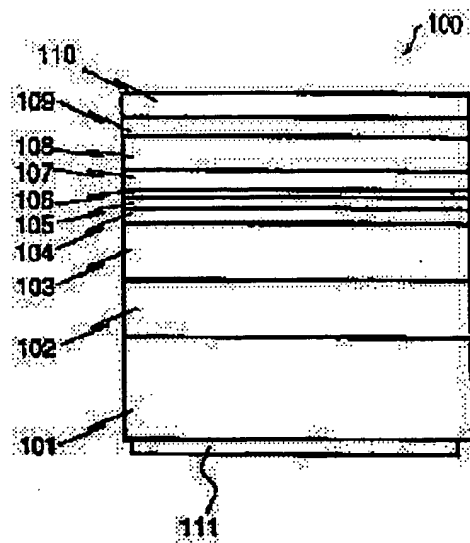
Priority country : JP

(54) SEMICONDUCTOR LASER ELEMENT AND OPTICAL INFORMATION REPRODUCING DEVICE

(57)Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To suppress the ripple of a far field pattern of a semiconductor laser, by so setting the compositions and the film thicknesses of its upper and lower guiding layers that the ripple of its far field pattern in the vertical direction to the surface of its laminated layer is suppressed.

SOLUTION: In a semiconductor laser element 100, the compositions and the film thicknesses of its $n\text{-In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$ lower guiding layer 104 (film thickness $d_1 \mu\text{m}$) and its $p\text{-In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$ upper guiding layer 107 (film thickness $d_2 \mu\text{m}$) are so set that the condition of $n_{eq} \geq n_{\text{GaN}}$ is satisfied between an equivalent refractive index n_{eq} of its oscillation mode and a refractive index n_{GaN} of its GaN layer 101. The case satisfying this condition exists about within the scope of $0.06 \geq d_1 + d_2$, $0.01 \leq y_1$, and $0.01 \leq y_2$. In the semiconductor laser element 100 existent within the scope satisfying this condition, there can be obtained always a single-humped far field pattern whose ripple is suppressed to the extent of no problem occurring.



LEGAL STATUS

[Date of request for examination]

[Date of sending the examiner's decision of rejection]

[Kind of final disposal of application other than the examiner's decision of rejection or application converted registration]

[Date of final disposal for application]

[Patent number]

[Date of registration]

[Number of appeal against examiner's decision of

rejection]

[Date of requesting appeal against examiner's
decision of rejection]

[Date of extinction of right]

Copyright (C); 1998,2003 Japan Patent Office

(19)日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11)特許出願公開番号

特開2001-85796

(P2001-85796A)

(43)公開日 平成13年3月30日(2001.3.30)

(51)Int.Cl.⁷

識別記号

F I

テーマコード(参考)

H 0 1 S 5/343

H 0 1 S 5/343

G 1 1 B 7/125

G 1 1 B 7/125

A

審査請求 未請求 請求項の数15 O L (全 19 頁)

(21)出願番号 特願2000-205787(P2000-205787)

(22)出願日 平成12年7月6日(2000.7.6)

(31)優先権主張番号 特願平11-195390

(32)優先日 平成11年7月9日(1999.7.9)

(33)優先権主張国 日本 (J P)

(71)出願人 000005049

シャープ株式会社

大阪府大阪市阿倍野区長池町22番22号

(72)発明者 伊藤 茂稔

大阪府大阪市阿倍野区長池町22番22号 シ

ャープ株式会社内

(72)発明者 山崎 幸生

大阪府大阪市阿倍野区長池町22番22号 シ

ャープ株式会社内

(72)発明者 種谷 元隆

大阪府大阪市阿倍野区長池町22番22号 シ

ャープ株式会社内

(74)代理人 100078282

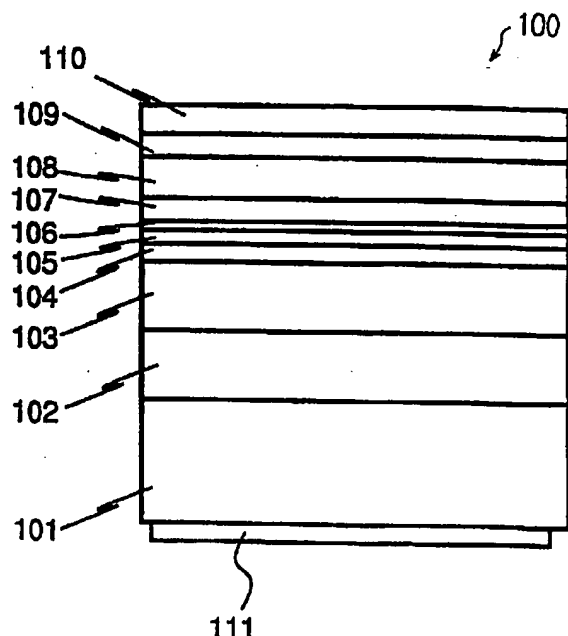
弁理士 山本 秀策

(54)【発明の名称】 半導体レーザ素子および光学式情報再生装置

(57)【要約】

【課題】 リップルを抑制したレーザを歩留まりよく生成する。

【解決手段】 GaN層と、 $Al_{x1}Ga_{1-x1}N$ ($0.05 \leq x1 \leq 0.2$) 下部クラッド層と、 $In_{y1}Ga_{1-y1}N$ ($0 < y1 < 1$) 下部ガイド層 (膜厚 $d1$ [μm]) と、 $Al_{a1}In_{b1}Ga_{1-a1-b1}N_{1-e1-f1}P_{e1}As_{f1}$ ($0 \leq a1, 0 \leq b1, a1+b1 \leq 1, 0 \leq e1, 0 \leq f1, e1+f1 < 0.5$) 井戸層と $Al_{a2}In_{b2}Ga_{1-a2-b2}N_{1-e2-f2}P_{e2}As_{f2}$ ($0 \leq a2, 0 \leq b2, a2+b2 \leq 1, 0 \leq e2, 0 \leq f2, e2+f2 < 0.5$) 障壁層との交互多層構造からなる活性層 (膜厚 Wa [μm]) と、 $In_{y2}Ga_{1-y2}N$ ($0 < y2 < 1$) 上部ガイド層 (膜厚 $d2$ [μm]) と、 $Al_{x2}Ga_{1-x2}N$ ($0.05 \leq x2 \leq 0.2$) 上部クラッド層と、をこの順に備えた半導体レーザ素子は、積層面に垂直方向のファーフールドパターンにおけるリップルが抑制されるように、下部ガイド層および上部ガイド層の膜厚と組成を設定する。



(2)

1

【特許請求の範囲】

【請求項1】 GaN層と、

Al_{x1}Ga_{1-x1}N (0.05 ≤ x₁ ≤ 0.2) 下部クラッド層と、In_{y1}Ga_{1-y1}N (0 < y₁ < 1) 下部ガイド層 (膜厚 d₁ [μm]) と、Al_{a1}In_{b1}Ga_{1-a1-b1}N_{1-e1-f1}Pe₁As_{f1} (0 ≤ a₁, 0 ≤ b₁, a₁ + b₁ ≤ 1, 0 ≤ e₁, 0 ≤ f₁, e₁ + f₁ < 0.5) 井戸層と Al_{a2}In_{b2}Ga1-a2-b2N_{1-e2-f2}Pe₂As_{f2} (0 ≤ a₂, 0 ≤ b₂, a₂ + b₂ ≤ 1, 0 ≤ e₂, 0 ≤ f₂, e₂ + f₂ < 0.5) 障壁層との交互多層構造からなる活性層 (膜厚 W_a [μm]) と、In_{y2}Ga_{1-y2}N (0 < y₂ < 1) 上部ガイド層 (膜厚 d₂ [μm]) と、Al_{x2}Ga_{1-x2}N (0.05 ≤ x₂ ≤ 0.2) 上部クラッド層と、をこの順に備えた半導体レーザ素子であって、

積層面に垂直方向のファーフールドパターンにおけるリップルが抑制されるように、該下部ガイド層および該上部ガイド層の膜厚と組成を設定してなることを特徴とする半導体レーザ素子。

【請求項2】 GaN層と、

Al_{x1}Ga_{1-x1}N (0.05 ≤ x₁ ≤ 0.2) 下部クラッド層と、In_{y1}Ga_{1-y1}N (0 < y₁ < 1) 下部ガイド層 (膜厚 d₁ [μm]) と、Al_{a1}In_{b1}Ga_{1-a1-b1}N_{1-e1-f1}Pe₁As_{f1} (0 ≤ a₁, 0 ≤ b₁, a₁ + b₁ ≤ 1, 0 ≤ e₁, 0 ≤ f₁, e₁ + f₁ < 0.5) 井戸層と Al_{a2}In_{b2}Ga1-a2-b2N_{1-e2-f2}Pe₂As_{f2} (0 ≤ a₂, 0 ≤ b₂, a₂ + b₂ ≤ 1, 0 ≤ e₂, 0 ≤ f₂, e₂ + f₂ < 0.5) 障壁層との交互多層構造からなる活性層 (膜厚 W_a [μm]) と、In_{y2}Ga_{1-y2}N (0 < y₂ < 1) 上部ガイド層 (膜厚 d₂ [μm]) と、Al_{x2}Ga_{1-x2}N (0.05 ≤ x₂ ≤ 0.2) 上部クラッド層と、をこの順に備えた半導体レーザ素子であって、該半導体レーザ素子の発振光の導波モード等価屈折率 n_{eq}と、該GaN層の屈折率 n_{GaN}との間に、n_{eq} ≥ n_{GaN}の関係が成立するように、該下部ガイド層および該上部ガイド層の膜厚と組成を設定してなることを特徴とする半導体レーザ素子。

【請求項3】 GaN層と、

Al_{x1}Ga_{1-x1}N (0.05 ≤ x₁ ≤ 0.2) 下部クラッド層と、In_{y1}Ga_{1-y1}N (0 < y₁ < 1) 下部ガイド層 (膜厚 d₁ [μm]) と、Al_{a1}In_{b1}Ga_{1-a1-b1}N_{1-e1-f1}Pe₁As_{f1} (0 ≤ a₁, 0 ≤ b₁, a₁ + b₁ ≤ 1, 0 ≤ e₁, 0 ≤ f₁, e₁ + f₁ < 0.5) 井戸層と Al_{a2}In_{b2}Ga

2

1-a2-b2N_{1-e2-f2}Pe₂As_{f2} (0 ≤ a₂, 0 ≤ b₂, a₂ + b₂ ≤ 1, 0 ≤ e₂, 0 ≤ f₂, e₂ + f₂ < 0.5) 障壁層との交互多層構造からなる活性層 (膜厚 W_a [μm]) と、In_{y2}Ga_{1-y2}N (0 < y₂ < 1) 上部ガイド層 (膜厚 d₂ [μm]) と、Al_{x2}Ga_{1-x2}N (0.05 ≤ x₂ ≤ 0.2) 上部クラッド層と、をこの順に備えた半導体レーザ素子であって、

該下部ガイド層および該上部ガイド層の膜厚と組成を、

0.06 ≤ d₁ + d₂ ≤ 0.1かつ0.06 ≤ y₁, 0.06 ≤ y₂, もしくは、0.1 < d₁ + d₂ ≤ 0.15かつ0.04 ≤ y₁, 0.04 ≤ y₂, もしくは、0.15 < d₁ + d₂ ≤ 0.2かつ0.03 ≤ y₁, 0.03 ≤ y₂, もしくは、0.2 < d₁ + d₂ ≤ 0.3かつ0.015 ≤ y₁, 0.015 ≤ y₂, もしくは、0.3 < d₁ + d₂かつ0.01 ≤ y₁, 0.01 ≤ y₂, のいずれかの範囲に設定してなることを特徴とする半導体レーザ素子。

【請求項4】 GaN層と、

Al_{x1}Ga_{1-x1}N (0.05 ≤ x₁ ≤ 0.2) 下部クラッド層と、In_{y1}Ga_{1-y1}N (0 < y₁ < 1) 下部ガイド層 (膜厚 d₁ [μm]) と、Al_{a1}In_{b1}Ga_{1-a1-b1}N_{1-e1-f1}Pe₁As_{f1} (0 ≤ a₁, 0 ≤ b₁, a₁ + b₁ ≤ 1, 0 ≤ e₁, 0 ≤ f₁, e₁ + f₁ < 0.5) 井戸層と Al_{a2}In_{b2}Ga1-a2-b2N_{1-e2-f2}Pe₂As_{f2} (0 ≤ a₂, 0 ≤ b₂, a₂ + b₂ ≤ 1, 0 ≤ e₂, 0 ≤ f₂, e₂ + f₂ < 0.5) 障壁層との交互多層構造からなる活性層 (膜厚 W_a [μm]) と、In_{y2}Ga_{1-y2}N (0 < y₂ < 1) 上部ガイド層 (膜厚 d₂ [μm]) と、Al_{x2}Ga_{1-x2}N (0.05 ≤ x₂ ≤ 0.2) 上部クラッド層と、をこの順に備えた半導体レーザ素子であって、

該下部ガイド層および該上部ガイド層の膜厚と組成を、

y ≥ 0.003/d - 0.003 + (0.007 - 0.22 × W_a) + (-0.010 + 0.10 × x) [ただし、d = (d₁ + d₂) / 2、y = (y₁ × d₁ + y₂ × d₂) / (d₁ + d₂)、x = (x₁ + x₂) / 2]

の範囲に設定してなることを特徴とする半導体レーザ素子。

【請求項5】 情報記録面に有する光ディスクに照射されたレーザ光の反射光を光電変換することにより、該光ディスクに記録された記録情報を再生する光学式情報再

(3)

3

生装置であって、請求項1、2、3、4のいずれかに記載の半導体レーザ素子を光源として用いることを特徴とする光学式情報再生装置。

【請求項6】 GaN層と、

$Al_{x1}Ga_{1-x1}N$ ($0.05 \leq x1 \leq 0.2$) 下部クラッド層と、

$In_{y1}Ga_{1-y1}N$ ($0 < y1 < 1$) 下部ガイド層と、

$Al_{a1}In_{b1}Ga_{1-a1-b1}N_{1-e1-f1}P_{e1}As_{f1}$ ($0 \leq a1, 0 \leq b1, a1+b1 \leq 1, 0 \leq e1, 0 \leq f1, e1+f1 < 0.5$) 井戸層と $Al_{a2}In_{b2}Ga_{1-a2-b2}N_{1-e2-f2}P_{e2}As_{f2}$ ($0 \leq a2, 0 \leq b2, a2+b2 \leq 1, 0 \leq e2, 0 \leq f2, e2+f2 < 0.5$) 障壁層との交互多層構造からなる活性層と、

$In_{y2}Ga_{1-y2}N$ ($0 < y2 < 1$) 上部ガイド層と、

$Al_{x2}Ga_{1-x2}N$ ($0.05 \leq x2 \leq 0.2$) 上部クラッド層と、

を備えた半導体レーザ素子であって、

該下部ガイド層の膜厚 $d1 \mu m$ 、該下部ガイド層の In 組成 $y1$ 、該上部ガイド層の膜厚 $d2 \mu m$ 、および、該上部ガイド層の In 組成 $y2$ が

$0.06 \leq d1 + d2$ 、

$0.01 \leq y1, 0.01 \leq y2$

の関係を満たす、半導体レーザ素子。

【請求項7】 前記下部ガイド層の膜厚 $d1 \mu m$ および該下部ガイド層の In 組成 $y1$ が、 $y1 \geq 0.003/d1 - 0.003$ の関係を満たす、請求項6に記載の半導体レーザ素子。

【請求項8】 前記下部ガイド層の膜厚 $d1 \mu m$ および該下部ガイド層の In 組成 $y1$ が、 $y1 \geq 0.003/d1 + 0.002$ の関係を満たす、請求項7に記載の半導体レーザ素子。

【請求項9】 前記上部ガイド層の膜厚 $d2 \mu m$ および該上部ガイド層の In 組成 $y2$ が、 $y2 \geq 0.003/d2 - 0.003$ の関係を満たす、請求項6に記載の半導体レーザ素子。

【請求項10】 前記上部ガイド層の膜厚 $d2 \mu m$ および該上部ガイド層の In 組成 $y2$ が、 $y2 \geq 0.003/d2 + 0.002$ の関係を満たす、請求項9に記載の半導体レーザ素子。

【請求項11】 前記下部ガイド層の In 組成 $y1$ 、前記下部ガイド層の厚さ $d1 \mu m$ 、前記上部ガイド層の In 組成 $y2$ 、前記上部ガイド層の厚さ $d2 \mu m$ および前記活性層の厚さ $Wa \mu m$ が、

$y \geq 0.003/d - 0.003 + (0.007 - 0.22 \times Wa)$

ここで、 $d = (d1 + d2) / 2$ 、

$y = (y1 \times d1 + y2 \times d2) / (d1 + d2)$ 、
の関係を満たす請求項6に記載の半導体レーザ素子。

【請求項12】 前記下部ガイド層の In 組成 $y1$ 、前記下部ガイド層の厚さ $d1 \mu m$ 、前記上部ガイド層の In

4

組成 $y2$ 、前記上部ガイド層の厚さ $d2 \mu m$ および前記活性層の厚さ $Wa \mu m$ が、

$y \geq 0.003/d + 0.002 + (0.007 - 0.22 \times Wa)$

ここで、 $d = (d1 + d2) / 2$ 、

$y = (y1 \times d1 + y2 \times d2) / (d1 + d2)$ 、

の関係を満たす請求項11に記載の半導体レーザ素子。

【請求項13】 前記下部ガイド層の In 組成 $y1$ 、前記下部ガイド層の厚さ $d1$ 、前記下部クラッド層の Al 組成 $x1$ 、前記上部ガイド層の In 組成 $y2$ 、前記上部ガイド層の厚さ $d2$ および前記上部クラッド層の Al 組成 $x2$ が、

$y \geq 0.003/d - 0.003 + (-0.010 + 0.10 \times x)$

ここで、 $d = (d1 + d2) / 2$ 、

$y = (y1 \times d1 + y2 \times d2) / (d1 + d2)$ 、

$x = (x1 + x2) / 2$ 、

との関係を満たす、請求項6に記載の半導体レーザ素子。

【請求項14】 前記下部ガイド層の In 組成 $y1$ 、前記下部ガイド層の厚さ $d1$ 、前記下部クラッド層の Al 組成 $x1$ 、前記上部ガイド層の In 組成 $y2$ 、前記上部ガイド層の厚さ $d2$ および前記上部クラッド層の Al 組成 $x2$ が、

$y \geq 0.003/d + 0.002 + (-0.010 + 0.10 \times x)$

ここで、 $d = (d1 + d2) / 2$ 、

$y = (y1 \times d1 + y2 \times d2) / (d1 + d2)$ 、

$x = (x1 + x2) / 2$ 、

との関係を満たす、請求項13に記載の半導体レーザ素子。

【請求項15】 請求項6に記載の半導体レーザ素子と、

光検出器とを備え、

該半導体レーザ素子から出射されたレーザ光を光ディスクに照射し、該光ディスクからの反射光に基づいて、該光ディスクに記録された情報を再生する光学式情報再生装置。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】 本発明は、窒化ガリウム系半導体を用いた半導体レーザ素子およびそれを用いた光学式情報再生装置に関し、特に、FFP (Far Field Pattern) が良好な半導体レーザ装置に関連する。

【0002】

【従来の技術】 GaN、InN、AlN およびそれらの混晶半導体に代表される窒化物系半導体材料により、青色から紫外領域で発光する半導体レーザ素子が試作されている。図16は、ジャパニーズ=ジャーナル=オブ=

50

(4)

5

アブライド=フィジックス38号L184~L186ページ(Masaru KURAMOTO et al.: Jpn. J. Appl. Phys. vol. 38 (1999) pp. L184-L186)で報告された、波長405nmで発振する窒化物半導体レーザ素子1600を示す図である。半導体レーザ素子1600は、n-GaN1601層(膜厚100μm)上に、n-Al_{0.07}Ga_{0.93}N下部クラッド層1602(膜厚1μm)、n-GaN下部ガイド層1603(膜厚0.1μm)、In_{0.2}Ga_{0.8}N(膜厚3nm)/In_{0.05}Ga_{0.95}N(膜厚5nm)-3重量子井戸活性層1604、p-Al_{0.19}Ga_{0.81}Nキャップ層1605(膜厚20nm)、p-GaN上部ガイド層1606(膜厚0.1μm)、p-Al_{0.07}Ga_{0.93}N上部クラッド層1607(膜厚0.5μm)、p-GaNコンタクト層1608(膜厚0.05μm)が順次積層形成されており、また、これらの上下にはそれぞれ電極1609、1610が形成されている。レーザ素子1600では、活性層1604およびガイド層1603、1606がクラッド層1602、1607に挟まれた導波構造を有しており、活性層で発光した光は、この導波構造内に閉じ込められて、レーザ発振動作を生じる。

【0003】

【発明が解決しようとする課題】しかしながら、上記従来の半導体レーザ素子1600では、以下に示すような問題が生じる。本発明者らにより上記構造の半導体レーザ素子1600を作製したところ、図17に示すようなFFP(ファーフールドパターン)が得られた。図17の横軸は角度であり、活性層1604に垂直でその長手方向に平行な面内におけるビームの角度を示し、図17の縦軸は、ビーム強度の相対値を示す。なお、本明細書中では、半導体レーザ積層構造に垂直な方向のFFPを問題にしており、これを、単にFFPと記載している。本明細書において、FFPとは、レーザ光の開口部から離れた場所で求めた光ビーム強度の角度分布のことである。図17のグラフにおいて、FFP1701、1702は、上記構造の半導体レーザ素子1600の結果であり、+20°付近にサブピークが生じているほか、多数のリップルが見られる。図17に示されるようにリップルは、素子によってはFFP1701のように極めて抑制されているものもあるが、FFP1702のように、顕著なものも見られる。また、FFP1703は、上記半導体レーザ素子1600の構造において、n-Al_{0.07}Ga_{0.93}N下部クラッド層1602の膜厚を上記1μmから0.7μmへと小さくした場合のFFPであり、±20°付近のサブピークが非常に大きくなっている。

【0004】図17にFFPとして図示しないが、基板として用いられているGaN層1601の結晶品質を低下させたり、不純物量を大きくしたりすると20°付近

6

のサブピーク等のリップルは減少することが本発明者らの研究により判明した。逆に、寿命特性の良好な半導体レーザ素子を得るために、結晶欠陥の少ない高品質の結晶をGaN層1601に用いたり、GaN層1601の不純物濃度を減少させると、±20°付近のリップルが増大する。図17におけるFFP1701とFFP1702のリップルの違いは、これらの状況が素子により微妙に異なるために生じているものと考えられる。また、さらに、一般に、下部AlGaInクラッド層1602の下にあるGaN層1601の膜厚が大きいほど、リップルは顕著になることも実験的に判明した。よって、通常基板の厚さは50μm以上と大きいため、基板にGaNを使用した場合には、サファイアを基板として使用した場合にくらべて、このようなリップルを抑制することが極めて困難である。

【0005】このように、従来の技術によれば、FFPにリップルが生じてしまい、最悪の場合、FFP強度は単峰のパターンが得られないことがある。これは、上述のように、(1)下部クラッド層1602の層厚を厚くする、(2)GaN層1601の結晶品質を低下させる、(3)GaN層1601の不純物量を増大させる、のいずれかにより抑制される。しかし、上記(1)としてGaN層1601上にAlGaIn下部クラッド層1602を厚く形成すると、クラックが発生するおそれがある。また、上記(2)としてGaN層1601の結晶品質を低下させる、あるいは上記(3)として不純物量を増大させると、形成される半導体レーザ素子1600の寿命特性が悪化するおそれがある。したがって、上記(1)~(3)の手法には限界があり、歩留まりよく、十分に抑制することが困難であった。

【0006】FFPにリップルが生じると、光ピックアップ等への応用時に、集光が不十分になったり、迷光の発生の原因になるので、好ましくない。本発明は、上記問題を解消し、光ピックアップ等へ応用して最適な窒化物半導体レーザ素子を提供し、また、集光特性の優れた光学式情報再生装置を実現することを目的とする。

【0007】

【課題を解決するための手段】本発明の半導体レーザ素子は、GaN層と、Al_{x1}Ga_{1-x1}N(0.05≤x₁≤0.2)下部クラッド層と、In_{y1}Ga_{1-y1}N(0<y₁<1)下部ガイド層(膜厚d₁[μm])と、Al_{a1}In_{b1}Ga_{1-a1-b1}N_{1-e1-f1}Pe₁As_{f1}(0≤a₁、0≤b₁、a₁+b₁≤1、0≤e₁、0≤f₁、e₁+f₁<0.5)井戸層とAl_{a2}In_{b2}Ga_{1-a2-b2}N_{1-e2-f2}Pe₂As_{f2}(0≤a₂、0≤b₂、a₂+b₂≤1、0≤e₂、0≤f₂、e₂+f₂<0.5)障壁層との交互多層構造からなる活性層(膜厚W_a[μm])と、In_{y2}Ga_{1-y2}N(0<y₂<1)上部ガイド層(膜厚d₂[μm])と、Al_{x2}Ga_{1-x2}N(0.05≤x₂≤0.2)上部クラッド層と、をこの

(5)

7

順に備えた半導体レーザ素子であって、積層面に垂直方向のファーフールドパターンにおけるリップルが抑制されるように、該下部ガイド層および該上部ガイド層の膜厚と組成を設定してなることを特徴とする。

【0008】また、本発明の半導体レーザ素子は、Ga N層と、 $Al_{x1}Ga_{1-x1}N$ ($0.05 \leq x1 \leq 0.2$) 下部クラッド層と、 $In_{y1}Ga_{1-y1}N$ ($0 < y1 < 1$) 下部ガイド層 (膜厚 $d1$ [μm]) と、 $Al_{a1}In_{b1}Ga_{1-a1-b1}N_{1-e1-f1}P_{e1}As_{f1}$ ($0 \leq a1, 0 \leq b1, a1+b1 \leq 1, 0 \leq e1, 0 \leq f1, e1+f1 < 0.5$) 井戸層と $Al_{a2}In_{b2}Ga_{1-a2-b2}N_{1-e2-f2}P_{e2}As_{f2}$ ($0 \leq a2, 0 \leq b2, a2+b2 \leq 1, 0 \leq e2, 0 \leq f2, e2+f2 < 0.5$) 障壁層との交互多層構造からなる活性層 (膜厚 Wa [μm]) と、 $In_{y2}Ga_{1-y2}N$ ($0 < y2 < 1$) 上部ガイド層 (膜厚 $d2$ [μm]) と、 $Al_{x2}Ga_{1-x2}N$ ($0.05 \leq x2 \leq 0.2$) 上部クラッド層と、をこの順に備えた半導体レーザ素子であって、該半導体レーザ素子の発振光の導波モード等価屈折率 n_{eq} と、該Ga N層の屈折率 n_{GaN} との間に、 $n_{eq} \geq n_{GaN}$ の関係が成立するように、該下部ガイド層および該上部ガイド層の膜厚と組成を設定してなることを特徴とする。

【0009】以上の構成により、従来の技術の半導体レーザ素子の課題が解決される。

【0010】さらに、本発明の半導体レーザ素子は、Ga N層と、 $Al_{x1}Ga_{1-x1}N$ ($0.05 \leq x1 \leq 0.2$) 下部クラッド層と、 $In_{y1}Ga_{1-y1}N$ ($0 < y1 < 1$) 下部ガイド層 (膜厚 $d1$ [μm]) と、 $Al_{a1}In_{b1}Ga_{1-a1-b1}N_{1-e1-f1}P_{e1}As_{f1}$ ($0 \leq a1, 0 \leq b1, a1+b1 \leq 1, 0 \leq e1, 0 \leq f1, e1+f1 < 0.5$) 井戸層と $Al_{a2}In_{b2}Ga_{1-a2-b2}N_{1-e2-f2}P_{e2}As_{f2}$ ($0 \leq a2, 0 \leq b2, a2+b2 \leq 1, 0 \leq e2, 0 \leq f2, e2+f2 < 0.5$) 障壁層との交互多層構造からなる活性層 (膜厚 Wa [μm]) と、 $In_{y2}Ga_{1-y2}N$ ($0 < y2 < 1$) 上部ガイド層 (膜厚 $d2$ [μm]) と、 $Al_{x2}Ga_{1-x2}N$ ($0.05 \leq x2 \leq 0.2$) 上部クラッド層と、をこの順に備えた半導体レーザ素子であって、該下部ガイド層および該上部ガイド層の膜厚と組成を、 $0.06 \leq d1+d2 \leq 0.1$ かつ $0.06 \leq y1, 0.06 \leq y2$ 、もしくは、 $0.1 < d1+d2 \leq 0.15$ かつ $0.04 \leq y1, 0.04 \leq y2$ 、もしくは、 $0.15 < d1+d2 \leq 0.2$ かつ $0.03 \leq y1, 0.03 \leq y2$ 、もしくは、 $0.2 < d1+d2 \leq 0.3$ かつ $0.015 \leq y1, 0.015 \leq y2$ 、もしくは、 $0.3 < d1+d2$ かつ $0.01 \leq y1, 0.01 \leq y2$ 、のいずれかの範囲に設定してなることを特徴とする。

【0011】さらに、本発明の半導体レーザ素子は、Ga N層と、 $Al_{x1}Ga_{1-x1}N$ ($0.05 \leq x1 \leq 0.2$) 下部クラッド層と、 $In_{y1}Ga_{1-y1}N$ ($0 < y1 < 50$

8

1) 下部ガイド層 (膜厚 $d1$ [μm]) と、 $Al_{a1}In_{b1}Ga_{1-a1-b1}N_{1-e1-f1}P_{e1}As_{f1}$ ($0 \leq a1, 0 \leq b1, a1+b1 \leq 1, 0 \leq e1, 0 \leq f1, e1+f1 < 0.5$) 井戸層と $Al_{a2}In_{b2}Ga_{1-a2-b2}N_{1-e2-f2}P_{e2}As_{f2}$ ($0 \leq a2, 0 \leq b2, a2+b2 \leq 1, 0 \leq e2, 0 \leq f2, e2+f2 < 0.5$) 障壁層との交互多層構造からなる活性層 (膜厚 Wa [μm]) と、 $In_{y2}Ga_{1-y2}N$ ($0 < y2 < 1$) 上部ガイド層 (膜厚 $d2$ [μm]) と、 $Al_{x2}Ga_{1-x2}N$ ($0.05 \leq x2 \leq 0.2$) 上部クラッド層と、をこの順に備えた半導体レーザ素子であって、該下部ガイド層および該上部ガイド層の膜厚と組成を、 $y \geq 0.003/d - 0.003 + (0.007 - 0.22 \times Wa) + (-0.010 + 0.10 \times x)$ [ただし、 $d = (d1+d2)/2$ 、 $y = (y1 \times d1 + y2 \times d2) / (d1+d2)$ 、 $x = (x1+x2)/2$] の範囲に設定してなることを特徴とする。

【0012】上記本発明の半導体レーザ素子において、好ましくは、 $y1 \leq b1 - 0.08$ 、 $y2 \leq b1 - 0.08$ であり、さらに好ましくは、 $y1 \leq b1 - 0.1$ 、 $y2 \leq b1 - 0.1$ の範囲に限定される。

【0013】また、上記本発明の半導体レーザ素子において、好ましくは、 $y1 \geq 0.01$ 、 $y2 \geq 0.01$ 、 $y \leq 0.16 - 0.6 \times d$ であり、さらに好ましくは、 $y1 \geq 0.01$ 、 $y2 \geq 0.01$ 、 $y \leq 0.13 - 0.6 \times d$ である。最も好ましい様態として、さらに、 $y1 \geq 0.02$ 、 $y2 \geq 0.02$ 、 $d \leq 0.12$ の範囲に限定される。

【0014】なお、下部ガイド層とは、 $AlGa N$ 下部クラッド層と、活性層とに挟まれた、 Al を構成元素として含まない層のことであり、必ずしも一層の構成である必要はない。2、3、4、5層等の複数の組成の異なる $InGa N$ 薄膜あるいは GaN 薄膜の積層構造やさらに多数の薄膜からなる超格子積層構造であってもよく、この場合、各薄膜の膜厚で加重平均した組成を下部ガイド層の In 組成 $y1$ とする。また、上部ガイド層とは、 $AlGa N$ 上部クラッド層と、活性層とに挟まれた、 Al を構成元素として含まない層のことであり、必ずしも一層の構成である必要はない。2、3、4、5層等の複数の組成の異なる $InGa N$ 薄膜あるいは GaN 薄膜の積層構造やさらに多数の薄膜からなる超格子積層構造であってもよく、この場合、各薄膜の膜厚で加重平均した組成を上部ガイド層の In 組成 $y2$ とする。

【0015】本発明の光学式情報再生装置は、情報記録面を有する光ディスクに照射されたレーザ光の反射光を光電変換することにより、該光ディスクに記録された記録情報を再生する光学式情報再生装置であって、前述のいずれかの本発明の半導体レーザ素子を光源として用いることを特徴とし、これにより、従来の技術の問題点が解決される。

(6)

9

【0016】さらに、本発明の半導体レーザ素子はGa N層と、 $Al_{x1}Ga_{1-x1}N$ ($0.05 \leq x1 \leq 0.2$) 下部クラッド層と、 $In_{y1}Ga_{1-y1}N$ ($0 < y1 < 1$) 下部ガイド層と、 $Al_{a1}In_{b1}Ga_{1-a1-b1}N_{1-e1-f1}P_{e1}As_{f1}$ ($0 \leq a1, 0 \leq b1, a1+b1 \leq 1, 0 \leq e1, 0 \leq f1, e1+f1 < 0.5$) 井戸層と $Al_{a2}In_{b2}Ga_{1-a2-b2}N_{1-e2-f2}P_{e2}As_{f2}$ ($0 \leq a2, 0 \leq b2, a2+b2 \leq 1, 0 \leq e2, 0 \leq f2, e2+f2 < 0.5$) 障壁層との交互多層構造からなる活性層と、 $In_{y2}Ga_{1-y2}N$ ($0 < y2 < 1$) 上部ガイド層と、 $Al_{x2}Ga_{1-x2}N$ ($0.05 \leq x2 \leq 0.2$) 上部クラッド層と、を備えた半導体レーザ素子であって、該下部ガイド層の膜厚 $d1 \mu m$ 、該下部ガイド層のIn組成 $y1$ 、該上部ガイド層の膜厚 $d2 \mu m$ 、および、該上部ガイド層のIn組成 $y2$ が $0.06 \leq d1+d2$ 、 $0.01 \leq y1$ 、 $0.01 \leq y2$ の関係を満たす。

【0017】前記下部ガイド層の膜厚 $d1 \mu m$ および該下部ガイド層のIn組成 $y1$ が、 $y1 \geq 0.003/d1 - 0.003$ の関係を満たしてもよい。

【0018】前記下部ガイド層の膜厚 $d1 \mu m$ および該下部ガイド層のIn組成 $y1$ が、 $y1 \geq 0.003/d1 + 0.002$ の関係を満たしてもよい。

【0019】前記上部ガイド層の膜厚 $d2 \mu m$ および該上部ガイド層のIn組成 $y2$ が、 $y2 \geq 0.003/d2 - 0.003$ の関係を満たしてもよい。

【0020】前記上部ガイド層の膜厚 $d2 \mu m$ および該上部ガイド層のIn組成 $y2$ が、 $y2 \geq 0.003/d2 + 0.002$ の関係を満たしてもよい。

【0021】前記下部ガイド層のIn組成 $y1$ 、前記下部ガイド層の厚さ $d1 \mu m$ 、前記上部ガイド層のIn組成 $y2$ 、前記上部ガイド層の厚さ $d2 \mu m$ および前記活性層の厚さ $Wa \mu m$ が、 $y \geq 0.003/d - 0.003 + (0.007 - 0.22 \times Wa)$ 、ここで、 $d = (d1+d2)/2$ 、 $y = (y1 \times d1 + y2 \times d2)/(d1+d2)$ 、の関係を満たしてもよい。

【0022】前記下部ガイド層のIn組成 $y1$ 、前記下部ガイド層の厚さ $d1 \mu m$ 、前記上部ガイド層のIn組

$$(2\pi/\Lambda) = (2\pi/\lambda) \sin \theta \quad (1)$$

を満たす θ の方向に、リップルが生じることになる。この振動成分を持つ電界の分布が大きい、すなわち、電界強度が強い、もしくは、広い範囲にわたって存在するほど、リップルが顕著になることになる。

【0028】図16に示す従来の窒化物半導体レーザ素子1600の構造において、スラブ導波路における導波※

$$E[x] \sim \exp[\pm j(2\pi/\Lambda)x] \quad (2)$$

$$\Lambda = \lambda / (n_{GaN}^2 - n_{eq}^2)^{0.5} \quad (3)$$

$$\sim 1 \mu m$$

この Λ により生じるリップル角度は、上式(1)より約 23° であり、図17におけるサブピーク位置とほぼ一致する。また、FFP1703のように下部クラッド厚

10

*成 $y2$ 、前記上部ガイド層の厚さ $d2 \mu m$ および前記活性層の厚さ $Wa \mu m$ が、 $y \geq 0.003/d + 0.002 + (0.007 - 0.22 \times Wa)$ 、ここで、 $d = (d1+d2)/2$ 、 $y = (y1 \times d1 + y2 \times d2)/(d1+d2)$ 、の関係を満たしてもよい。

【0023】前記下部ガイド層のIn組成 $y1$ 、前記下部ガイド層の厚さ $d1$ 、前記下部クラッド層のAl組成 $x1$ 、前記上部ガイド層のIn組成 $y2$ 、前記上部ガイド層の厚さ $d2$ および前記上部クラッド層のAl組成 $x2$ が、 $y \geq 0.003/d - 0.003 + (-0.010 + 0.10 \times x)$ 、ここで、 $d = (d1+d2)/2$ 、 $y = (y1 \times d1 + y2 \times d2)/(d1+d2)$ 、 $x = (x1+x2)/2$ 、との関係を満たしてもよい。

【0024】前記下部ガイド層のIn組成 $y1$ 、前記下部ガイド層の厚さ $d1$ 、前記下部クラッド層のAl組成 $x1$ 、前記上部ガイド層のIn組成 $y2$ 、前記上部ガイド層の厚さ $d2$ および前記上部クラッド層のAl組成 $x2$ が、 $y \geq 0.003/d + 0.002 + (-0.010 + 0.10 \times x)$ 、ここで、 $d = (d1+d2)/2$ 、 $y = (y1 \times d1 + y2 \times d2)/(d1+d2)$ 、 $x = (x1+x2)/2$ 、との関係を満たしてもよい。

【0025】本発明の光学式情報再生装置は上記に記載の半導体レーザ素子と、光検出器とを備え、該半導体レーザ素子から出射されたレーザ光を光ディスクに照射し、該光ディスクからの反射光に基づいて、該光ディスクに記録された情報を再生する。

【0026】

【発明の実施の形態】始めに、本発明の原理について述べる。

【0027】TEモードで発振する半導体レーザ素子において、角度 θ におけるFFP強度は、導波モードの垂直方向 x の電界分布 $E[x]$ の、係数を $(2\pi/\lambda) \sin \theta$ (λ は発光波長)としたフーリエ変換であるから、電界分布に、周期 Λ の振動成分が強くあれば、

※理論からGa N層の屈折率 n_{GaN} は2.540、導波モードの等価屈折率 n_{eq} は、2.51と見積もられ、よって、 $n_{GaN} > n_{eq}$ の関係があるから、Ga N層中で電界 $E[x]$ は周期 Λ で振動している。数式で示すと、以下のようなになる。

【0029】

層1602を薄くすると $\pm 20^\circ$ 付近のサブピーク強度が増大するのは、Ga N層1601と活性層1604・ガイド層1603、1606との距離が小さくなること

(7)

11

により、Ga_N層1601への電界の分布が大きくなり、その結果、FFPが悪化するためと考えられる。さらに、本発明者らの実験により、基板としてサファイアを使用し、Ga_N層1601の厚さを減らすと、平均的にはFFPが改善されることが判明した。これは、Ga_N層1601への電界の分布が減少した結果を示していると考えられる。また、さらに、Ga_N基板として用いられるGa_N層1601の結晶品質を低下させたり、不純物量を大きくしたりするとリップルが減少するとい

う、本発明者らの検討結果は、これらの変化によりGa_N層1601の光吸収が大きくなって、結果として、導波モードのGa_N層における電界分布が小さくなり、FFPが改善されることを示しているものと考えられる。以上の考察および検討事実から、特に±20°付近に顕著に生じることの多いリップルの原因を、下部クラッド層1602の外側に存在するGa_N層1601における電界の振動であると推測した。

【0030】Ga_N層1601における電界の振動が原因で生じるFFPのリップルを根本的に生じなくさせるためには、上述の考察から、Ga_N層1601において電界が振動成分を持たないようにすればよく、これは、

(2)式におけるexp関数の引数を実数とすること、すなわち、 $n_{\text{Ga}N} \leq n_{\text{eq}}$ とすればよい。この場合には、Ga_N層1601における電界 $E[x]$ がx方向に減衰することになる。なお、ここでの議論では、Ga_N層および実効屈折率の虚数成分は実数成分に比較して十分小さいので、無視している。 n_{eq} の値をこのような条件を満たすように変更できるかどうか、本発明者らが種々検討した結果、ガイド層を特定の組成・膜厚のIn_yGa_{1-y}N(0<y<1)とすれば、達成できることを見出した。

【0031】図1は、本発明の半導体レーザ素子100を示す模式図である。図1は、半導体レーザ素子100の導波路部分の共振器に沿った断面を示している。本半導体レーザ素子100は、n-Ga_N基板101(膜厚30~300μm)上に、その上に順次、n-Ga_N中間層102(膜厚0~30μm)、n-Al_xGa_{1-x}N(0.05≤x≤0.2)下部クラッド層103(膜厚0.5μm~10μm)、n-In_y1Ga_{1-y}1N*

$$E_g = E_{g1}[s] = 3.42(1-s) + 2.65s - 3.94s(1-s) \quad (4)$$

Al_tGa_{1-t}N(0≤t≤1)に対しては、

$$E_g = E_{g2}[t] = 3.42(1-t) + 6.2t - 1.057t(1-t) \quad (5)$$

In_sAl_tGa_{1-s-t}N(0<s<1, 0<t<1, 0≤s+t≤1)に対しては、

$$E_g = \{s \times E_{g1}[s+t] + t \times E_{g2}[s+t]\} / (s+t) \quad (6)$$

上記(4)~(6)により、屈折率 $n(p[\lambda])$ は、

$$p[\lambda] = 1 / [1/\lambda - (E_g - 3.42) / 1239.852]$$

12

* (0<y<1) 下部ガイド層104(膜厚d₁[μm])、In_{b1}Ga_{1-b1}N(0<b₁<1) 井戸層とIn_{b2}Ga_{1-b2}N(0≤b₂<b₁) 障壁層との交互多層構造からなる活性層105(発光波長370~500nm、総膜厚5~60nm)、AlGa_Nキャップ層106(膜厚0~20nm)、p-In_{y2}Ga_{1-y2}N(0<y₂<b₁) 上部ガイド層107(膜厚d₂[μm])、p-Al_{x2}Ga_{1-x2}N(0.05≤x₂≤0.2) 上部クラッド層108(膜厚0.4μm~10μm)、p-Ga_Nコンタクト層109の各窒化物系半導体層が形成されている。さらに、p-Ga_Nコンタクト層109の上面には、金属電極(例えば、Pd/Au、Ni/Pd/Au、Pd/Pt/Au等)110が形成されており、また、n-Ga_N基板の裏面には金属電極(例えば、Ti/Al、Zr/Al、Hf/Alなど)111が形成されている。ここでは、n-Ga_N基板101とn-Ga_N中間層102を併せて、Ga_N層と呼ぶ。

【0032】半導体レーザ素子100において、下部ガイド層104および上部ガイド層107の組成および、膜厚は、発振モードの n_{eq} が、Ga_N層の屈折率 $n_{\text{Ga}N}$ との間に、 $n_{\text{eq}} \geq n_{\text{Ga}N}$ が成立するように設定されている。

【0033】等価屈折率 n_{eq} は、スラブ導波路における通常の電界分布計算により求めることができる。例えば、ジャーナル・オブ・アプライド・フィジクス84号1196~1203ページ(M. J. Bergman and H. C. Casey, Jr.: Appl. Phys. vol. 84(1998) pp. 1196-1203)を参照することができる。また、電界分布計算におけるパラメータである、発振波長λ[nm]における各材料の屈折率 n_{eq} は、以下のように、求められる。発振波長λは300~800nmの範囲とすることができる。

【0034】まず、各材料のパラメータ E_g [eV]が次式で与えられる。

【0035】In_sGa_{1-s}N(0≤s≤1)に対しては、

(8)

$$\begin{aligned}
 & \text{とおくと、} \\
 & p[\lambda] > 360.7 \text{ のとき、} \\
 & n_{eq}(p[\lambda]) = [4.3663801 + p^2 / (p^2 - 295.92)]^{0.5} \\
 & \quad (7) \\
 & p[\lambda] \leq 360.7 \text{ のとき、} \\
 & n_{eq}(p[\lambda]) = c_0 + c_1 \times q + c_2 \times q^2 + c_3 \times q^3 + c_4 \times q^4 \quad (8)
 \end{aligned}$$

ここで、

$$\begin{aligned}
 q &= p[\lambda] - 360 \\
 c_0 &= 2.718 \\
 c_1 &= 9.976e-3 \\
 c_2 &= 3.005e-4 \\
 c_3 &= 4.584e-6 \\
 c_4 &= 2.596e-8
 \end{aligned}$$

である。本発明において、 n_{eq} はここに規定されたパラメータを用い、上述のスラブ導波路における電界分布計算により計算されるものである。

【0036】レーザ構造を構成する各層において、井戸層よりもエネルギーギャップの小さい組成の半導体からなる層と金属からなる層を除いて、吸収係数は小さいとして、無視してよい。また、基板である層101は、通常膜厚 $50\mu\text{m}$ 以上であり、LD導波路構造のコア部分である下部ガイド層104から上部ガイド層107までの膜厚（通常 $0.4\mu\text{m}$ 以下）と比較してかなり大きいので、基板の下面の導波モードに与える影響は小さいとして、無視してよい。すなわち、基板である層101の厚みを無限大として電界分布計算をすればよい。以上の手順により、本実施の形態におけるInGaN下部ガイド層104、InGaN上部ガイド層107の膜厚・組成が $n_{eq} \geq n_{\text{GaN}}$ となるように選定することができる。

【0037】以上の手順により、結果として、およそ、 $0.06 \leq d_1 + d_2$ 、 $0.01 \leq y_1$ 、 $0.01 \leq y_2$ の範囲内に上記条件を満たす場合が存在することがわかる。具体的には、 $0.06 \leq d_1 + d_2 \leq 0.1$ の場合には、 $0.06 \leq y_1$ 、 $0.06 \leq y_2$ 、 $0.1 < d_1 + d_2 \leq 0.15$ の場合には、 $0.04 \leq y_1$ 、 $0.04 \leq y_2$ 、 $0.15 < d_1 + d_2 \leq 0.2$ の場合には、 $0.03 \leq y_1$ 、 $0.03 \leq y_2$ 、 $0.2 < d_1 + d_2 \leq 0.3$ の場合には、 $0.015 \leq y_1$ 、 $0.015 \leq y_2$ 、 $0.3 < d_1 + d_2$ の場合には、 $0.01 \leq y_1$ 、 $0.01 \leq y_2$ である。

【0038】ここで、下部ガイド層104とは、AlGaIn下部クラッド層103と、活性層105とに挟まれた、Alを構成元素として含まない層を意味し、必ずしも一層の構成である必要はない。2、3、4、5層等の複数の組成の異なるInGaIn薄膜あるいはGaIn薄膜の積層構造、または、さらに多数の薄膜からなる超格子積層構造であってもよく、この場合、各薄膜の膜厚で加重平均した組成を下部ガイド層104のIn組成 y_1 とすればよい。また、上部ガイド層107とは、AlGa

14

N上部クラッド層103と、活性層105との間に挟まれた、Alを構成元素として含まない層を意味し、必ずしも一層の構成である必要はない。2、3、4、5層等の複数の組成の異なるInGaIn薄膜あるいはGaIn薄膜の積層構造、またはさらに多数の薄膜からなる超格子積層構造であってもよく、この場合、各薄膜の膜厚で加重平均した組成を上部ガイド層107のIn組成 y_2 とすればよい。

【0039】本条件を満たす範囲で、半導体レーザ素子100を作製したところ、単峰で、かつ、図17に現われていたリップルが問題にならない程度（10%以下）まで抑制されたFFPが常に得られ、良好な光学特性が

実現できた。

【0040】〔実施の形態1〕本実施の形態は、図1に概略図を示す半導体レーザ素子100の各層の膜厚・組成を以下のように形成した。 $n\text{-GaIn}$ 基板101（膜厚 $100\mu\text{m}$ ）、 $n\text{-GaIn}$ 中間層102（膜厚 $3\mu\text{m}$ ）、 $n\text{-Al}_{x1}\text{Ga}_{1-x1}\text{N}$ （ $x_1=0.1$ ）下部クラッド層103（膜厚 $0.8\mu\text{m}$ ）、 $n\text{-In}_{y1}\text{Ga}_{1-y1}\text{N}$ （ $y_1=0.035$ ）下部ガイド層104（膜厚 $0.1\mu\text{m}$ ）、 $\text{In}_{b1}\text{Ga}_{1-b1}\text{N}$ （ b_1 は約 0.17 ）井戸層（膜厚 2nm ）、 $\text{In}_{b2}\text{Ga}_{1-b2}\text{N}$ （ $b_2=0.05$ ）障壁層（膜厚 4nm ）との交互多層構造（障壁層／井戸層／・・・／井戸層／障壁層）からなる5重量子井戸活性層105（発光波長 410nm 、総膜厚 34nm ）、 $\text{Al}_z\text{Ga}_{1-z}\text{N}$ （ $z=0.2$ ）キャップ層106（膜厚 18nm ）、 $p\text{-In}_{y2}\text{Ga}_{1-y2}\text{N}$ （ $y_2=0.035$ ）上部ガイド層107（膜厚 $0.1\mu\text{m}$ ）、 $p\text{-Al}_{x2}\text{Ga}_{1-x2}\text{N}$ （ $x_2=0.1$ ）上部クラッド層108（膜厚 $0.5\mu\text{m}$ ）、 $p\text{-GaIn}$ コンタクト層109（膜厚 $0.1\mu\text{m}$ ）。

【0041】本実施の形態の半導体レーザ素子100の構成において、FFPを測定したところ、図2のように単峰のプロファイルが得られ、リップルはほとんど見られず（3%以下）、良好な放射特性が得られることが判明した。なお、室温における発振閾値は 60mA であり、 80°C においても連続発振動作が確認できた。

【0042】比較例として、本実施の形態による半導体レーザ素子100のガイド層104、107のInGaInの代わりに、従来の半導体レーザ素子1600のようにGaInを用いた半導体レーザ素子を作製したところ、そのレーザ素子は、図17のFFP1702と同様の、リップルのあるFFP特性を有した。このように、本実

(9)

15

施の形態によれば、光学特性の優れた半導体レーザ素子を得ることができた。

【0043】本実施の形態の半導体レーザ素子100の発振モードの等価屈折率を上記手法により見積もったところ、 $n_{eq}=2.547$ であり、Ga N層の屈折率 $n_{GaN}=2.540$ よりも大きかった。これにより、 $n-GaN$ 基板101、 $n-GaN$ 中間層102、 $p-GaN$ コンタクト層109等での電界の振動成分が無くなり、よって、良好な放射特性が得られたものと考えられる。

【0044】次に、本実施の形態の半導体レーザ素子100の構造から、 $In_{y1}Ga_{1-y1}N$ 下部ガイド層104および $In_{y2}Ga_{1-y2}N$ 上部ガイド層107のIn組成 $y1$ および $y2$ と、それらの膜厚 $d1$ [μm]、 $d2$

[μm]を種々変更して、等価屈折率の値を計算した結果を図3のグラフに示す。図3の黒丸は計算された点であり、曲線はそれらをなめらかに結ぶ。ここでは、説明を簡略化する目的で、ガイド層104、107のIn組成および厚さをそれぞれ等しい、すなわち $y1=y2$ 、 $d1=d2$ となるように形成した。図3に示されるガイド層厚は、各ガイド層104、107の厚さ($d1=d2$)である。図3に示されるように、ガイド層のIn組成が0すなわち、ガイド層がGa Nからなる場合には、ガイド層厚を $0.025\sim 0.15\mu m$ と変えても、等価屈折率の値はGa Nの屈折率 2.540 を超えない。ガイド層のIn組成を0から 0.09 へと変化させる、あるいは、ガイド層厚を増加させるほど、一般に等価屈折率は増大し、ガイド層厚が $0.15\mu m$ の場合には、In組成は約 0.016 以上、ガイド層厚が $0.1\mu m$ の場合には、In組成は約 0.028 以上、ガイド層厚が $0.05\mu m$ の場合には、In組成は約 0.057 以上で等価屈折率の値はGa Nの屈折率 2.540 を超える。ガイド層厚が $0.025\mu m$ の場合、いずれのIn組成でも、等価屈折率の値がGa Nの屈折率 2.540 を超えない。上述のように、ここで、下部ガイド層104とは、Al Ga N下部クラッド層103と、活性層105とに挟まれたAlを構成元素として含まない層を意味し、必ずしも一層の構成である必要はない。2、3、4、5層等の複数の組成の異なるIn Ga N薄膜あるいはGa N薄膜の積層構造やさらに多数の薄膜からなる超格子積層構造であってもよく、この場合、各薄膜の膜厚で加重平均した組成を下部ガイド層104のIn組成 $y1$ とすればよい。このことは、実施の形態2ないし9においても同じように適用される。また、上部ガイド層107とは、Al Ga N上部クラッド層108と、活性層105とに挟まれた、Alを構成元素として含まない層のことであり、必ずしも一層の構成である必要はない。2、3、4、5層等の複数の組成の異なるIn Ga N薄膜あるいはGa N薄膜の積層構造やさらに多数の薄膜からなる超格子積層構造であってもよく、この場合、各薄

16

膜の膜厚で加重平均した組成を上部ガイド層107のIn組成 $y2$ とすればよい。このことは、実施の形態2ないし9においても同じように適用される。

【0045】ガイド層104、107の厚さおよびIn組成が等しい(すなわち、 $d1=d2$ 、 $y1=y2$)場合に、等価屈折率 n_{eq} とGa Nの屈折率 n_{GaN} とが等しくなる、ガイド層厚とガイドIn組成との値を黒丸で図4に示し、曲線Aは黒丸をなめらかに結ぶ。図4は、横軸にガイド層厚、縦軸にガイド層In組成を示す。曲線Aは、 $y1=0.003/d1=0.003$ で近似できる。曲線A上の領域(曲線Aを含む)、すなわち、近似的に $y1\geq 0.003/d1=0.003$ を満たす範囲で、等価屈折率 n_{eq} はGa Nの屈折率 n_{GaN} 以上($n_{eq}\geq n_{GaN}$)になり、基板等のGa N層101、102に起因するリップルが無く、良好な光学特性を得ることができる。また、同様に、 $y2\geq 0.003/d2=0.003$ を満たすことで、等価屈折率 n_{eq} はGa Nの屈折率 n_{GaN} 以上($n_{eq}\geq n_{GaN}$)になり、良好な光学特性を得ることができる。

【0046】なお、図3および図4での計算結果は、簡略化のために上下のIn Ga Nガイド層104、107の厚さおよびIn組成を対称、すなわち、 $d1=d2$ 、 $y1=y2$ とした。しかし、これは非対称であってもよく、この場合、上下ガイド層の平均厚さ、すなわち $(d1+d2)/2=d$ を、ガイド層厚と考えれば、図3および図4の関係はそのままほぼ同じであり、また、上下ガイド層の組成の加重平均、すなわち $(y1\times d1+y2\times d2)/(d1+d2)=y$ をガイド層In組成として考えれば、図3および図4の関係はそのままほぼ同じように適用可能である。ただし、実用的には非対称をあまり大きくすると、活性層への光閉じ込めに悪影響を及ぼすので、ある程度限定される。実用的には、 $y1$ と $y2$ との差は、 $-0.05\leq y1-y2\leq 0.05$ を満たすことが必要であり、特に好ましくは、 $-0.03\leq y1-y2\leq 0.03$ を満たす。また、 $d1$ と $d2$ との比は、実用的には、 $0.33\leq d1/d2\leq 3$ を満たすことが必要であり、特に好ましくは、 $0.56\leq d1/d2\leq 1.8$ を満たす。

【0047】さらに、曲線Aで示される条件を満たす種々の構造の半導体レーザ素子を作製したところ、曲線Aに近い条件、例えば、 $d=0.1[\mu m]$ かつ、 $y=0.003$ の場合や、 $d=0.07[\mu m]$ かつ、 $y=0.045$ の場合等には、必ずしも完全にFFPのリップルが防止されるわけではなく、同一ウェハ内でも、FFPの 0° 付近(正面付近)に微妙なリップルが生じてしまう素子が現われることがある。これは、In Ga Nの結晶成長では、相分離すなわち、結晶中の微小な組成揺らぎが生じてしまいやすく、そのような領域において、曲線Aで示される条件を逸脱してしまう場合があり、これが、悪影響を及ぼしているものと推察される。

(10)

17

実験的にこのような問題が生じない境界を求めたところ、 $y \geq 0.003/d + 0.002$ を満たす範囲であれば良いことが判明した。この境界を図4に曲線A'として示す。

【0048】良好な光学特性を得るための、ガイド層104、107の組成 y 、膜厚 d は、図4の曲線Aを含む右上の領域、好ましくは、曲線A'を含む右上の領域に限定されるが、次のような要請から、ガイド層104、107の好ましい範囲はさらに制限される。まず、組成に関して、井戸層にキャリアを良好に閉じ込める必要から、 $y_1 \leq b_1 - 0.08$ 、 $y_2 \leq b_1 - 0.08$ でなければならないことが、実験的に判明した。本実施形態において、 b_1 が約0.17である場合、In組成は約0.09より小さいことが好ましい。In組成が0.09である場合を図4に直線Bとして示す。直線Bより下側の領域が所望の範囲である。この範囲を逸脱して、ガイド層のIn組成が大きくなり、井戸層のIn組成に近づくと、キャリアの閉じ込めが十分でなくなり、発振動作が見られなくなるか、閾値が非常に高くなってしまった。さらに、好ましくは、 $y_1 \leq b_1 - 0.1$ 、 $y_2 \leq b_1 - 0.1$ を満たし（図4の直線B'より下側の領域である）、これにより、高温でも閾値の上昇が抑制され、50℃で1000時間以上の寿命が確保されるようになった。またさらには、ガイド層104、107のIn組成を障壁層のIn組成よりも小さくすること、すなわち、 $y_1 < b_2$ 、 $y_2 < b_2$ であることが最も好ましかった。これにより、井戸層へのキャリアの閉じ込めが良好なものとなったと考えられ、この範囲に限定した結果、70℃で1000時間以上の寿命が確保されるようになった。この点に関して記載の重複を避けるために、以降の実施の形態2ないし9での記載は省略するが、上記と同じ範囲で、好ましい範囲が適用される。

【0049】次に、大きいIn組成のガイド層を厚く形成すると、半導体レーザ素子の雑音特性および寿命特性に関して問題が生じることが判明した。これは、結晶成長により生じた組成揺らぎにより、活性層の組成自体が変調されることと、ガイド層自体の組成揺らぎが、活性層へのキャリア注入の空間的揺らぎを生じ、そのため、雑音特性および寿命特性に悪影響を及ぼすものと推測される。これにより、ガイド層104、107の厚みに関しても、好ましい範囲が限定される。In組成が0.01以上の結晶の場合、 $y \leq 0.16 - 0.6 \times d$ の範囲を満たせば（図4に示される直線Cの左下側の領域）、良好なInGaIn膜の形成が可能であり、戻り光量が0.001～10%の範囲で、相対雑音強度が -125 dB/Hz 以下の低雑音発振動作が可能であり、この範囲で室温で10000時間以上の寿命が確保されるようになった。より好ましくは、 $y \leq 0.13 - 0.6 \times d$ の範囲を満たせば（図4に示される直線C'の左下側の領域）、戻り光量が0.001～10%の範囲で、相対

18

雑音強度が -130 dB/Hz 以下の低雑音発振動作が可能であり、低雑音発振動作が可能で、かつ、40℃で10000時間以上の寿命が確保されるようになった。

【0050】さらに、ロット歩留まり良く特性の良好なレーザ素子を得る観点からは、ガイド層厚 d は $y_1 \geq 0.02$ 、 $y_2 \geq 0.02$ の結晶に対して、 $0.12 \mu\text{m}$ 以下であることが良く、これを超えた場合、In金属の堆積に起因して結晶成長後のウェハーが黒っぽく見えることが時々生じ、このようなウェハーから作製された半導体レーザ素子は特性が非常に悪いものしか得られないことがあった（必ず生じてしまうものではないが）。しかし、 $d \leq 0.12$ の範囲に限定することで、このような問題が防止された。以上、ここで説明した最も好ましい範囲（ $y \geq 0.003/d + 0.002$ 、 $y_1 \leq b_1 - 0.1$ 、 $y_2 \leq b_1 - 0.1$ 、 $y_1 < b_2$ 、 $y_2 < b_2$ 、 $d \leq 0.12$ 、ここで、 $b_1 = 0.17$ および $b_2 = 0.05$ ）を図4に斜線で示す。

【0051】この点に関して記載の重複を避けるために、以降の実施の形態2ないし9では記載は省略するが、上記と同じ範囲で、好ましい範囲が制限されるものである。

【0052】さらに、活性層の組成を調整して、発光波長を $380 \sim 430 \text{ nm}$ （20℃）の範囲としても、上述の関係式は変わらなかった。

【0053】〔実施の形態2〕図5に本実施形態の半導体レーザ素子500を示す。本実施の形態の半導体レーザ素子500は、実施の形態1における半導体レーザ素子100の活性層105を活性層505に変更した点を除くと半導体レーザ素子100と同じ構成を有する。本実施の形態における半導体レーザ素子500の活性層505の構成は、 $\text{In}_{b_1}\text{Ga}_{1-b_1}\text{N}$ （ b_1 は約0.17）井戸層（膜厚2nm）、 $\text{In}_{b_2}\text{Ga}_{1-b_2}\text{N}$ （ $b_2 = 0.05$ ）障壁層（膜厚4nm）との交互多層構造（障壁層／井戸層／障壁層／井戸層／障壁層）からなる2重量子井戸活性層（発光波長 410 nm 、総膜厚 1.6 nm ）である。本実施の形態における半導体レーザ素子500の活性層505は、実施形態1の半導体レーザ素子100の活性層105と多層構造の膜厚が異なる。

【0054】本実施の形態の半導体レーザ素子の構成において、FFPを測定したところ、図2に示した実施の形態1と同様に単峰でリップルがほとんど見られない（3%以下）プロファイルが得られ、良好な放射特性が得られることが判明した。なお、本実施の形態の半導体レーザ素子500において、室温における発振閾値は25mAであり、110℃においても連続発振動作が確認できた。

【0055】比較例として、本実施の形態と同じ構造の半導体レーザ素子500のInGaInからなるガイド層505として、従来の技術のようにGaNを用いた半導体レーザ素子を作製したところ、図17のFFP170

(11)

19

2と同様のリップルのあるFFP特性を有した。

【0056】このように、本実施の形態によれば、光学特性の改善された半導体レーザ素子を得ることができた。

【0057】本実施の形態の半導体レーザ素子500の発振モードの等価屈折率 n_{eq} を上記手法により見積もったところ、 $n_{eq}=2.543$ であり、Ga_{0.5}N層の屈折率 $n_{GaN}=2.540$ よりも大きかった。これにより、n-GaN基板101、n-GaN中間層102、p-GaNコンタクト層109等での電界の振動成分が無くなり、よって、良好な放射特性が得られたものと考えられる。

【0058】さらに、本実施の形態の変形例として、活性層の構成を、In_{b1}Ga_{1-b1}N (b₁は約0.17) 井戸層(膜厚2nm)、In_{b2}Ga_{1-b2}N (b₂=0.05) 障壁層(膜厚4nm)との交互多層構造(障壁層/井戸層/.../井戸層/障壁層)からなる3重量子井戸活性層(発光波長410nm、総膜厚22nm)としたところ、図2に示した実施の形態1と同様に単峰で、リップルがほとんど見られないFFPプロファイルが得られ、良好な放射特性となることが判明した。なお、この半導体レーザ素子において、室温における発振閾値は40mAであり、100℃においても連続発振動作が確認できた。この半導体レーザ素子の発振モードの等価屈折率 n_{eq} を上記手法により見積もったところ、 $n_{eq}=2.545$ であり、Ga_{0.5}N層の屈折率 $n_{GaN}=2.540$ よりも大きかった。これにより、n-GaN基板101、n-GaN中間層102、p-GaNコンタクト層109等での電界の振動成分が無くなり、よって、良好な放射特性が得られたものと考えられる。

【0059】次に、本実施の形態の半導体レーザ素子500の構造から、活性層505の構造を、その総膜厚を種々変更し、各活性層505の膜厚に対して、等価屈折率 n_{eq} の値がGa_{0.5}Nの屈折率 n_{GaN} を超えるときのガイド層In組成 y を計算し、示したグラフを図6に示す。図6によれば、活性層505の膜厚が10から50nmの範囲で、等価屈折率 n_{eq} の値がGa_{0.5}Nの屈折率 n_{GaN} を超えるようにするためのガイド層504、507の条件は実施の形態1の半導体レーザ素子100(活性層膜厚34nm)で説明したガイド層とほとんど変わらない(すなわち、実施形態1のガイド層104、107のIn組成は0.035であるのに対し、図6から求められるガイド層504、507のIn組成は、活性層505の膜厚が5~60nmの範囲で 0.035 ± 0.005 以内である)ことがわかる。厳密には、活性層505の膜厚が薄いほどIn組成 y を大きく設定する必要があるが、活性層膜厚が10nmの場合でも実施の形態1のガイド層のIn組成0.035に+0.005大きくする必要はあるだけである。また、活性層膜厚が厚いほどIn組成が小さくてもよいが、活性層膜厚50nm場合で

20

も実施の形態1のガイド層のIn組成0.035からIn組成は0.005程度小さくてもよいだけであり、実用上組成をこのレベルまで厳密にコントロールすることも難しいため、実施の形態1の半導体レーザ素子100で示した条件を活性層505の膜厚10~50nmの範囲で適用してもよい。より厳密には、活性層膜厚が、5~60nmのとき、図4の曲線Aで示される条件に活性層膜厚 W_a [μ m]による補正を加えて、 $y \geq 0.003/d - 0.003 + (0.007 - 0.22 \times W_a)$ とすればよいことが、図6から求められる。また、実施の形態1に記述したのと同じ理由により、好ましい範囲が、図4の曲線A'で示される条件に活性層膜厚 W_a [μ m]による補正を加えて、 $y \geq 0.003/d + 0.002 + (0.007 - 0.22 \times W_a)$ とすればよいことが、図6から求められる。

【0060】なお、本実施の形態のように、活性層の両端が障壁層であるとき、(<障壁層/井戸層/.../井戸層/障壁層>の構成)、活性層の両端の一方が障壁層であり、他方が井戸層であるとき(<障壁層/井戸層/.../障壁層/井戸層>の構成)、活性層の両端が井戸層であるとき、(<井戸層/障壁層/.../障壁層/井戸層>の構成)のいずれの場合においても、それら井戸層・障壁層の膜厚を加えあわせたものを活性層膜厚 W_a としてよく、いずれの場合においても、本実施の形態に示した関係式は保たれる。

【0061】さらに、活性層の組成を調整して、発光波長を380~440nm(20℃)の範囲としても、上述の関係式は変わらなかった。

【0062】[実施の形態3] 図7に本実施の形態の半導体レーザ素子700を示す。本実施の形態の半導体レーザ素子700は、実施の形態1における半導体レーザ素子100の上下のクラッド層103、108の組成および活性層105の構成を変更した点を除くと半導体レーザ素子100と同じである。本実施の形態における半導体レーザ素子700の活性層705の構成は、In_{b1}Ga_{1-b1}N (b₁は約0.17) 井戸層(膜厚2nm)、In_{b2}Ga_{1-b2}N (b₂=0.05) 障壁層(膜厚4nm)との交互多層構造(障壁層/井戸層/.../井戸層/障壁層)からなる3重量子井戸活性層(発光波長410nm、層膜厚22nm)である。本実施の形態における半導体レーザ素子700のそれぞれのクラッド層の構成は、n-Al_{x1}Ga_{1-x1}N (x₁=0.13) 下部クラッド層703(膜厚0.8 μ m)、p-Al_{x2}Ga_{1-x2}N (x₂=0.13) 上部クラッド層708(膜厚0.5 μ m)である。

【0063】本実施の形態の半導体レーザ素子700の構成において、FFPを測定したところ、図2に示した実施の形態1の半導体レーザ素子100と同様に単峰でリップルがほとんど見られない(3%以下)プロファイルが得られ、良好な放射特性が得られることが判明し

(12)

21

た。なお、本実施の形態の半導体レーザ素子700において、室温における発振閾値は25mAであり、110℃においても連続発振動作が確認できた。

【0064】比較例として、本実施の形態と同じ構造の半導体レーザ素子のInGa_Nからなるガイド層104、107として、従来の技術のようにGa_Nを用いると、本実施の形態と同じ構造の半導体レーザ素子を作製したところ、図17のFFP1702と同様の、リップルのあるFFP特性であった。このように、本実施の形態によれば、光学特性の改善された半導体レーザ素子700を得ることができた。

【0065】本実施の形態の半導体レーザ素子700の発振モードの等価屈折率 n_{eq} を上記手法により見積もったところ、 $n_{eq}=2.548$ であり、Ga_N層の屈折率 $n_{GaN}=2.540$ よりも大きかった。これにより、n-Ga_N基板701、n-Ga_N中間層702、p-Ga_Nコンタクト層709等での電界の振動成分が無くなり、よって、良好な放射特性が得られたものと考えられる。

【0066】さらに、本実施の形態における上下のクラッド層703、708の構成を、それぞれ、 $n-Al_{x1}Ga_{1-x1}N$ ($x1=0.07$) 下部クラッド層703 (膜厚0.8μm)、 $p-Al_{x2}Ga_{1-x2}N$ ($x2=0.07$) 上部クラッド層708 (膜厚0.5μm) としたところ、図2に示した実施の形態1の半導体レーザ素子100と同様に単峰で、リップルがほとんど見られない(5%以下)FFPプロファイルが得られ、良好な放射特性となることが判明した。なお、この半導体レーザ素子において、室温における発振閾値は70mAであった。この半導体レーザ素子700の発振モードの等価屈折率を上記手法により見積もったところ、 $n_{eq}=2.542$ でありGa_N層の屈折率 $n_{GaN}=2.540$ よりも大きかった。これにより、n-Ga_N基板101、n-Ga_N中間層102、p-Ga_Nコンタクト層109等での電界の振動成分が無くなり、よって、良好な放射特性が得られたものと考えられる。

【0067】次に、本実施の形態の半導体レーザ素子700の構造から、上下のクラッド層の構成を、その組成を種々変更して、上下のクラッド層703、708のAl組成に対して、等価屈折率 n_{eq} の値がGa_Nの屈折率 n_{GaN} を超えよきのガイド層In組成 y を計算した結果を図8のグラフに示す。ただし、説明を簡略化する目的で $x1=x2$ とした。図8によれば、クラッド層のAl組成が0.055から0.145の範囲で、等価屈折率 n_{eq} の値がGa_Nの屈折率 n_{GaN} を超えるようにするためのガイド層704、707の条件はクラッド層103、108のAl組成が0.1の場合(実施の形態1ならびに2の場合)とほとんど変わらない(すなわち、実施形態1においてガイド層104、107のIn組成は0.035であるのに対し、ガイド層704、707の

22

In組成は0.035±0.005以内)ことがわかる。詳細には、クラッド層のAl組成が大きいほどIn組成 y を大きく設定する必要があるが、クラッド層のAl組成0.145の場合でも実施の形態1に示した条件(ガイド層のIn組成0.035)にIn組成を+0.005大きくする必要があるだけであり、また、クラッド層のAl組成が小さいほどIn組成が小さくてもよいが、クラッド層のAl組成0.055の場合でも実施の形態1に示した条件からIn組成が0.005程度小さくてもよいだけであり、実用上組成をこのレベルまで厳密にコントロールすることも難しいため、実施の形態1に示した条件をクラッド層組成0.055から0.145の範囲で適用してもよい。なお、図8では、上下のクラッド層の組成を同じものとしたが、本発明の適用範囲はこの場合に限られるものではなく、図8を参照すれば明らかなように、クラッド層のAl組成が0.055から0.145の範囲で結果はほとんど変わらないものであるから、上下のクラッド層703、707の組成をこの範囲内で任意に変更しても良い。

【0068】また、より厳密には、クラッド層のAl組成 x が、 $0.05 \leq x \leq 0.2$ のとき、図4の曲線Aで示される条件にクラッド層のAl組成 x による補正を加えて、 $y \geq 0.003/d - 0.003 + (-0.010 + 0.10 \times x)$ とすればよいことが、図8から求められる。また、実施の形態1に記述したのと同じ理由により、好ましい範囲が、図4の曲線A'で示される条件にクラッド層のAl組成 x による補正を加えて、 $y \geq 0.003/d + 0.002 + (-0.010 + 0.10 \times x)$ とすればよいことが、図8から求められる。これらの式において、上下のクラッド層のAl組成が異なる場合には、その単純平均値 $(x1+x2)/2$ を x として考えれば良い。

【0069】さらに、AlGa_Nクラッド層の構成を組成の異なるいくつかの薄層AlGa_Nの交互積層からなるような、いわゆる超格子クラッド層とした場合、交互積層膜を構成する薄層の周期が30nm以下程度であれば、モードには影響しないので、その交互積層膜の平均組成を上記クラッド層の組成比 $x1$ 、 $x2$ としてよよく、上記の関係式はそのまま適用できる。

【0070】さらに、クラッド層の厚みを変える検討を行ったところ、下部クラッド層703に関して、膜厚0.6μm以上であれば、上述の条件を変更する必要はなかった。また、上部クラッド層708に関して、膜厚0.3μm以上であれば、上述の条件を変更する必要はなかった。

【0071】さらに、活性層705の組成を調整して、発光波長を380~440nm(20℃)の範囲としても、上述の関係式は変わらなかった。

【0072】〔実施の形態4〕本半導体レーザ素子は、実施の形態1の半導体レーザ素子100の変形例であ

(13)

23

り、図9に概略図を示す。本実施の形態の半導体レーザ素子900の各層の膜厚・組成を次のものとしたものである。 $n\text{-Ga}\text{N}$ 基板901 (膜厚 $70\mu\text{m}$) の上に $n\text{-Ga}\text{N}$ 第1中間層902 (膜厚 $4\mu\text{m}$)、 $n\text{-In}_c\text{Ga}_{1-c}\text{N}$ ($c=0.07$) 第2中間層912 (膜厚 $0.05\mu\text{m}$)、 $n\text{-Al}_{x1}\text{Ga}_{1-x1}\text{N}$ ($x1=0.1$) 下部クラッド層903 (膜厚 $0.7\mu\text{m}$)、 $n\text{-In}_{y1}\text{Ga}_{1-y1}\text{N}$ ($y1=0.035$) 下部ガイド層904 (膜厚 $0.1\mu\text{m}$)、 $\text{In}_{b1}\text{Ga}_{1-b1}\text{N}$ ($b1$ は約 0.17) 井戸層 (膜厚 2nm)、 $\text{In}_{b2}\text{Ga}_{1-b2}\text{N}$ ($b2=0.05$) 障壁層 (膜厚 4nm) との交互多層構造 (障壁層/井戸層/.../井戸層/障壁層) からなる5重量子井戸活性層905 (発光波長 410nm 、総膜厚 34nm)、 $p\text{-Al}_{z1}\text{Ga}_{1-z1}\text{N}$ ($z=0.2$) 下部キャップ層906 (膜厚 18nm)、 $p\text{-In}_{y2}\text{Ga}_{1-y2}\text{N}$ ($y2=0.035$) 上部ガイド層907 (膜厚 $0.1\mu\text{m}$)、 $p\text{-Al}_{z1}\text{Ga}_{1-z1}\text{N}$ ($z1=0.2$) 上部キャップ層913 (膜厚 5nm)、 $p\text{-Al}_{x2}\text{Ga}_{1-x2}\text{N}$ ($x2=0.1$) 上部クラッド層908 (膜厚 $0.5\mu\text{m}$)、 $p\text{-Ga}\text{N}$ コンタクト層909 (膜厚 $0.1\mu\text{m}$) が順次積層形成されている。本実施の形態においては、下部クラッド層903の下に $n\text{-In}_c\text{Ga}_{1-c}\text{N}$ 第2中間層912が介装されており、これは、積層構造中にクラックが導入されることを防止するための役割も果たしている。さらに、本実施の形態においては、上部ガイド層の上に $p\text{-Al}_{z1}\text{Ga}_{1-z1}\text{N}$ ($z1=0.2$) 上部キャップ層913が介装されており、これは、レーザ構造の積層形成中に、 In を含んで構成されるガイド層907の蒸発による劣化を防止するために設けたものである。

【0073】本実施の形態の半導体レーザ素子900の構成において、FFPを測定したところ、図2のように単峰のプロファイルが得られ、リップルはほとんど見られず (10% 以下)、良好な放射特性が得られることが判明した。なお、室温における発振閾値は 55mA であり、 80°C においても連続発振動作が確認できた。

【0074】比較例として、本実施の形態と同じ構造の半導体レーザ素子900の InGaP からなるガイド層904、907に従来の技術のように GaN を用いて半導体レーザ素子を作製したところ、図17のFFP1702と同様にリップルのあるFFP特性を有した。したがって、本実施の形態によれば、光学特性の優れた半導体レーザ素子900を得ることができる。

【0075】本実施の形態の半導体レーザ素子900の発振モードの等価屈折率 n_{eq} を上記方法により見積もったところ、 $n_{eq}=2.547$ であり、このように、 $n\text{-In}_c\text{Ga}_{1-c}\text{N}$ 第2中間層912をクラッド層の外部に介装しない実施の形態1の半導体レーザ素子100の場合と同じであった。これは、導波モードは、上下クラッド層903、908よりも内側の構造によりほぼ決定さ

24

れているので、等価屈折率 n_{eq} の値にはほとんど影響しないためであり、実施の形態1ないし3に示した等価屈折率 n_{eq} の値が GaN の屈折率を超える条件は本実施の形態のようにクラックを防止するための層 (InGaN で構成され膜厚 $0.1\mu\text{m}$ 以下) を導入しても変わらなかった。さらに、等価屈折率 n_{eq} が $p\text{-Al}_{z1}\text{Ga}_{1-z1}\text{N}$ ($z1=0.2$) 上部キャップ層913を上部ガイド層907と上部クラッド層908との間に介装しない実施の形態1の場合と同じであったのは、 $p\text{-Al}_{z1}\text{Ga}_{1-z1}\text{N}$ ($z1=0.2$) 上部キャップ層913が 20nm 以下と薄いために、等価屈折率 n_{eq} の値にはほとんど影響しないためであり、実施の形態1ないし3に示した等価屈折率 n_{eq} の値が GaN の屈折率 $n_{\text{Ga}\text{N}}$ を超える条件は本実施の形態のようにクラックを防止するための層 (InGaN で構成され膜厚 $0.1\mu\text{m}$ 以下) を導入しても変わらなかった。

【0076】〔実施の形態5〕図10に半導体レーザ素子1000を示す。半導体レーザ素子1000は、図9に概略図を示す半導体レーザ素子の各層の膜厚・組成を次のものとしたものである。 $n\text{-Ga}\text{N}$ 基板1001 (膜厚 $30\sim300\mu\text{m}$)、 $n\text{-Ga}\text{N}$ 第1中間層1002 (膜厚 $0\sim30\mu\text{m}$)、 $n\text{-In}_c\text{Ga}_{1-c}\text{N}$ ($0.01\leq c\leq 0.2$) 第2中間層1012 (膜厚 $0\sim0.1\mu\text{m}$)、 $n\text{-Al}_{x1}\text{Ga}_{1-x1}\text{N}$ ($0.05\leq x1\leq 0.2$) 下部クラッド層1003 (膜厚 $0.6\sim10\mu\text{m}$)、 $n\text{-In}_{y1}\text{Ga}_{1-y1}\text{N}$ ($y1\leq b1$) 下部ガイド層1004 (膜厚 $d1[\mu\text{m}]$)、 $\text{In}_{b1}\text{Ga}_{1-b1}\text{N}$ 井戸層、 $\text{In}_{b2}\text{Ga}_{1-b2}\text{N}$ ($b2<b1$) 障壁層との交互多層構造からなる量子井戸活性層1005 (発光波長 $370\sim440\text{nm}$ 、総膜厚 $W_a[\mu\text{m}]$)、 $\text{Al}_{z1}\text{Ga}_{1-z1}\text{N}$ ($0\leq z1\leq 0.3$) 下部キャップ層1006 (膜厚 $0\sim50\text{nm}$)、 $p\text{-In}_{y2}\text{Ga}_{1-y2}\text{N}$ ($y2\leq b1$) 上部ガイド層1007 (膜厚 $d2[\mu\text{m}]$)、 $p\text{-Al}_{z1}\text{Ga}_{1-z1}\text{N}$ ($0\leq z1\leq 0.3$) 上部キャップ層1013 (膜厚 $0\sim50\text{nm}$)、 $p\text{-Al}_{x2}\text{Ga}_{1-x2}\text{N}$ ($0.05\leq x2\leq 0.2$) 上部クラッド層1008 (膜厚 $0.4\sim10\mu\text{m}$)、 $p\text{-Ga}\text{N}$ コンタクト層1009 (膜厚 $0\sim10\mu\text{m}$)。ただし、 $d=(d1+d2)/2$ 、 $y=(y1\times d1+y2\times d2)/(d1+d2)$ 、 $x=(x1+x2)/2$ 、 $5\leq W_a\leq 60$ 、 $y\geq 0.003/d-0.003+(0.007-0.22\times W_a)+(-0.010+0.10\times x)$ の関係式を満たす。

【0077】本実施の形態の半導体レーザ素子の構成において、FFPを測定したところ、図2のように単峰のプロファイルが得られ、リップルはほとんど見られず、良好な放射特性が得られることが判明した。

【0078】さらに、ガイド層の組成、膜厚の範囲を、 $y\geq 0.003/d+0.002+(0.007-0.22\times W_a)+(-0.010+0.10\times x)$ の関係

50

(14)

25

式を満たすように限定したところ、実施の形態1に記載したのと同じ理由により、ウェハ内にはFFPの正面付近のリップルが生じてしまう素子が現われることが防止され、望ましい。

【0079】〔実施の形態6〕半導体レーザ素子1100は、実施の形態4の半導体レーザ素子900の変形例であり、 n -Ga N 基板901（膜厚70 μ m）をサファイア基板1101（膜厚60 μ m）とし、電極1111を n -Ga N 中間層1102に接続する構成とした点を除くと、半導体レーザ素子900と同じである。

【0080】本実施の形態の半導体レーザ素子1100の構成において、FFPを測定したところ、通常は、図2のように単峰のプロファイルが得られ、リップルは見られず、良好な放射特性が得られることが判明した。ただし、素子によっては、リップルが20%程度の強度見られることがあった。これは、導波路の近傍にサファイア/Ga N の様に、屈折率の大きく異なる界面が存在しているために、そこで反射が起こり、 n -Ga N 層の膜厚のバラツキにより、反射面の導波路との結合条件が微妙に変動し、最悪のケースでは、若干のリップルが発生してしまうためである。しかしながら、ガイド層の条件を実施の形態1ないし3に示した条件に設定することで、そうでない場合、例えば従来の技術のようにガイド層をGa N で構成した場合と比較すると、格段に光学的特性は向上しており、平均的にはほとんどリップルの無いFFP特性が得られるものであり、本実施の形態の様に、サファイア基板を用いた場合においても、本発明の効果が確認できた。サファイア基板の適用は、同様に、実施の形態1、2、3、5の半導体レーザ素子に対しても可能であり、同様の効果が確認できた。

【0081】〔実施の形態7〕半導体レーザ素子1200を図12に示す。半導体レーザ素子1200は、実施の形態1の半導体レーザ素子100の活性層105を、Ga N_{1-e1} Pe $_1$ （ e_1 は約0.03）井戸層（膜厚2nm）とGa N_{1-e2} Pe $_2$ （ e_2 は約0.01）障壁層（膜厚4nm）との交互多層構造からなる3重量子井戸活性層1205（発光波長400nm、総膜厚16nm）とした点を除くと、実施の形態1と同様の構成である。本実施の形態においても、実施の形態1と同様に光学的特性に優れた半導体レーザ素子1200が得られた。また、活性層1205の組成を若干変更させたところ、発光波長360～550nmの範囲で、同様の効果が得られた。

【0082】〔実施の形態8〕半導体レーザ素子1300は、実施の形態1の半導体レーザ素子100の活性層105を、Ga N_{1-e2} As e_2 （ e_2 は約0.02）井戸層（膜厚3nm）とIn b_2 Ga $_{1-b2}$ N（ b_2 は約0.05）障壁層（膜厚5nm）との交互多層構造からなる2重量子井戸活性層1305（発光波長440nm、総膜厚21nm）とした他は、実施の形態1と同様の構成で

26

ある。本実施の形態においても、実施の形態1と同様に光学的特性に優れた半導体レーザ素子が得られた。また、活性層の組成を若干変更させたところ、発光波長360～550nmの範囲で、同様の効果が得られた。

【0083】〔実施の形態9〕半導体レーザ素子1400を図14に示す。半導体レーザ素子1400は、実施の形態1の半導体レーザ素子100の活性層105を、Al a_1 In b_1 Ga $_{1-a1-b1}$ N $_{1-e1-f1}$ Pe $_1$ As f_1 （ $0 \leq a_1$, $0 \leq b_1$, $a_1 + b_1 \leq 1$, $0 \leq e_1$, $0 \leq f_1$, $e_1 + f_1 < 0.5$ ）井戸層とAl a_2 In b_2 Ga $_{1-a2-b2}$ N $_{1-e2-f2}$ Pe $_2$ As f_2 （ $0 \leq a_2$, $0 \leq b_2$, $a_2 + b_2 \leq 1$, $0 \leq e_2$, $0 \leq f_2$, $e_2 + f_2 < 0.5$ ）障壁層との交互多層構造からなる活性層1405（発光波長360～550nm、総膜厚5～50nm）とした他は、実施の形態1と同様の構成である。

【0084】本実施の形態においても、実施の形態1と同様に光学的特性に優れた半導体レーザ素子が得られた。

【0085】以上の実施の形態の中では、上下のガイド層をInGa N として説明してきたが、本発明の適用はこれに限られるものではなく、Ga N に添加するとその屈折率の大きくなるようなIn以外の他の元素、例えば、As、P、Tl等を添加した材料を添加した材料であつてもよい。すなわち、ガイド層を、Ga N As、Ga N P、Ga N PAs、InGa N As、InGa N P、InGa N PAs、TlGa N 、TlInGa N 等としてもよい。特に、Ga N Asの場合、これまでの実施の形態の中で説明してきたIn組成の6分の1をAs組成とすることで、変換された組成の範囲で、同様の効果が得られる。特に、Ga N Pの場合、これまでの実施の形態の中で説明してきたIn組成の4分の1をP組成とすることで、変換された組成の範囲で、同様の効果が得られる。

【0086】さらに、本発明の半導体レーザ素子は、さまざまな実施形態の組み合わせも含み得ることは当業者には明らかである。

【0087】〔実施の形態10〕図15は、本実施の形態の光学式情報再生装置1500を示す。基台21、基台21上に設置された実施の形態1の半導体レーザ素子100、コリメータレンズ23、ビームスプリッタ24、対物レンズ25、光ディスク26、反射光を集光するためのレンズ27、集光された光を検出する光検出器28とからなっている。この光学式情報再生装置1500において、半導体レーザ素子100から出射したレーザ光は、コリメータレンズ23で平行光もしくは平行に近い光に変換され、ビームスプリッタ24を透過して、対物レンズ25により光ディスク26の情報記録面に集光される。光ディスク26の情報記録面には、凹凸もしくは磁気変調もしくは屈折率変調によりビット情報が書き込まれている。集光されたレーザ光は、そこで反射さ

(15)

27

れ、対物レンズ25を通してビームスプリッタ24によって分岐され、反射光を集光するためのレンズ27によって光検出器28に集光され、光学的に検出された信号を電気的信号に変換して記録情報の読み取りが行われる。

【0088】本実施の形態の光学式情報再生装置1500においては、FFPのリップルの抑制された光学的特性の良好な半導体レーザ素子100を用いたので、対物レンズ25により光ディスク26の情報記録面に高解像に集光され、その結果、 5 M/mm^2 もの高密度で記録された光ディスクから、ビット誤り率 10^{-6} で、書き込まれた情報を読み出すことができた。

【0089】一方、比較例として、半導体レーザ素子100のガイド層に従来の半導体レーザ素子1600のようにGaInを用いた半導体レーザ素子を図15における半導体レーザ素子100に変えて用いたところ、同様の条件のもとで、ビット誤り率 10^{-3} であり、実用に適さなかった。このように高密度に記録された光ディスクから、低誤り率で情報を読み出せたことにより、本実施の形態の光学式情報再生装置1500によれば、光ディスク上への高解像の集光が可能となったことが確認された。

【0090】さらに、本実施の形態の光学式情報再生装置における半導体レーザ素子100を実施の形態2～9の半導体レーザ素子に置換したところ、いずれの場合においても、上述の条件で、ビット誤り率 $10^{-5} \sim 10^{-7}$ が達成され、光ディスク上への高解像の集光が可能となったことが確認された。

【0091】

【発明の効果】本発明によれば、窒化ガリウム系半導体を用いた半導体レーザ素子において、ガイド層の構成を所定のものとするることにより、単峰でリップルの抑制されたファーフールドパターンを実現でき、光学的特性の優れた半導体レーザ素子を提供できる。本発明によれば、光学式情報再生装置において、このような半導体レーザ素子を用いることにより、高解像で集光できるようになり、高密度に記録された光ディスクの読み取りが可能になる。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の第1の実施形態の半導体レーザ素子を示す図である。

【図2】本発明の半導体レーザ素子のFFP特性を示す図である。

【図3】ガイド層In組成と等価屈折率の関係を示す図である。

【図4】本発明の半導体レーザ素子のガイド層条件を示す図である。

【図5】本発明の第2の実施形態の半導体レーザ素子を示す図である。

【図6】活性層層厚を変化させたときのガイド層条件を

28

示す図である。

【図7】本発明の第3の実施形態の半導体レーザ素子を示す図である。

【図8】クラッド層A1組成を変化させたときのガイド層条件を示す図である。

【図9】本発明の第4の実施形態の半導体レーザ素子を示す図である。

【図10】本発明の第5の実施形態の半導体レーザ素子を示す図である。

【図11】本発明の第6の実施形態の半導体レーザ素子を示す図である。

【図12】本発明の第7の実施形態の半導体レーザ素子を示す図である。

【図13】本発明の第8の実施形態の半導体レーザ素子を示す図である。

【図14】本発明の第9の実施の形態の半導体レーザ素子を示す図である。

【図15】本発明の光学式情報再生装置を示す図である。

【図16】従来技術の半導体レーザ素子を示す図である。

【図17】従来技術の半導体レーザ素子のFFP特性を示す図である。

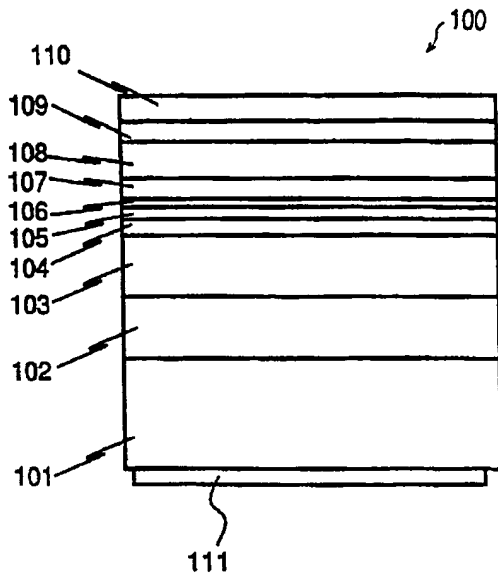
【符号の説明】

101	n-GaN基板
102	n-GaN中間層
103	n-Al _{x1} Ga _{1-x1} N下部クラッド層
104	n-In _{y1} Ga _{1-y1} N下部ガイド層
105	量子井戸活性層
106	Al _x Ga _{1-z} Nキャップ層
107	p-In _{y2} Ga _{1-y2} N上部ガイド層
108	p-Al _{x2} Ga _{1-x2} N上部クラッド層
109	p-GaNコンタクト層
110、111	電極
504	n-In _{y1} Ga _{1-y1} N下部ガイド層
505	量子井戸活性層
507	p-In _{y2} Ga _{1-y2} N上部ガイド層
703	n-Al _{x1} Ga _{1-x1} N下部クラッド層
705	量子井戸活性層
708	p-Al _{x2} Ga _{1-x2} N上部クラッド層
901、1001	n-GaN基板
902、1002	n-GaN中間層
903、1003	n-Al _{x1} Ga _{1-x1} N下部クラッド層
904、1004	n-In _{y1} Ga _{1-y1} N下部ガイド層
905、1005	量子井戸活性層
906、1006	p-Al _z Ga _{1-z} Nキャップ層
907、1007	p-In _{y2} Ga _{1-y2} N上部ガイド層

(16)

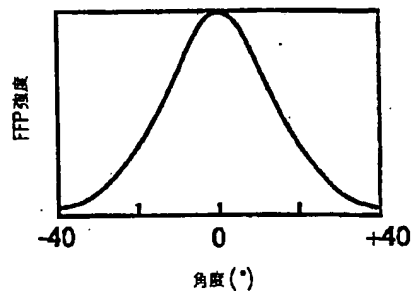
29
 908、1008 $p\text{-Al}_{x2}\text{Ga}_{1-x2}\text{N}$ 上部クラッド層
 909、1009 $p\text{-Ga}\text{N}$ コンタクト層
 910、911、1010、1011 電極
 912 $n\text{-In}_c\text{Ga}_{1-c}\text{N}$ 中間層
 913 $p\text{-Al}_{z1}\text{Ga}_{1-z1}\text{N}$ キャップ層

【図1】

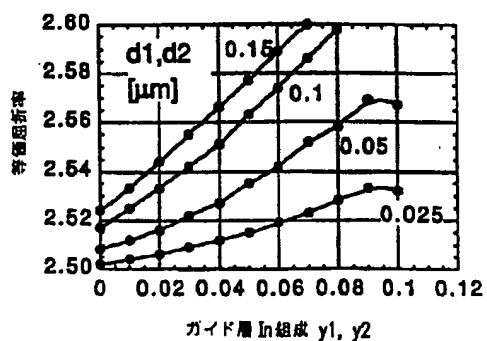


30
 1101 サファイア基板
 1102 $n\text{-Ga}\text{N}$ 中間層
 1111 電極
 1205 量子井戸活性層
 1305 量子井戸活性層
 1405 量子井戸活性層

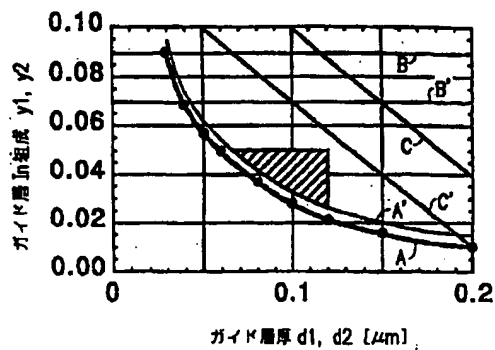
【図2】



【図3】

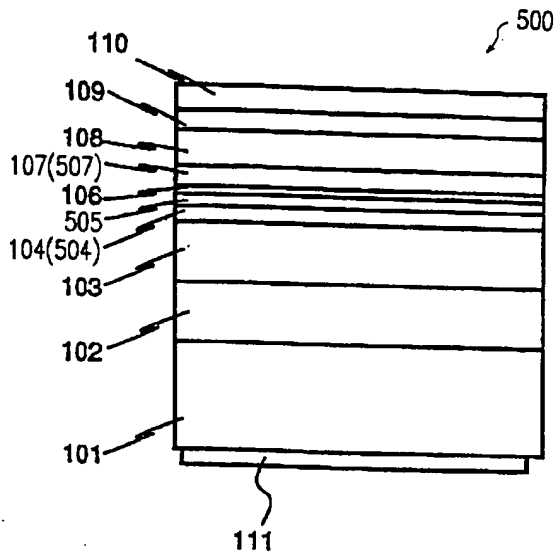


【図4】

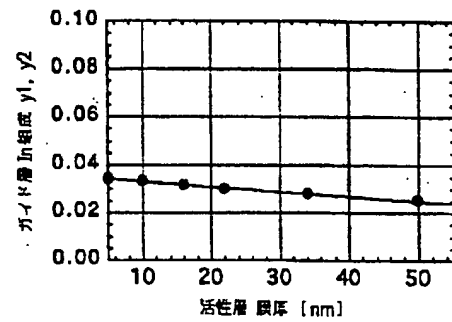


(17)

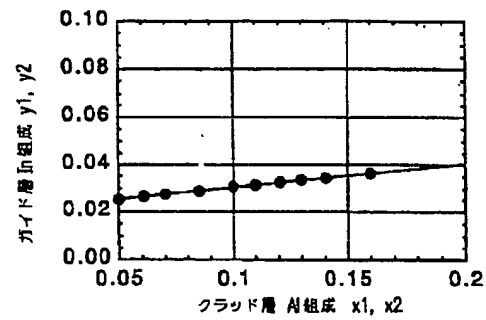
【図5】



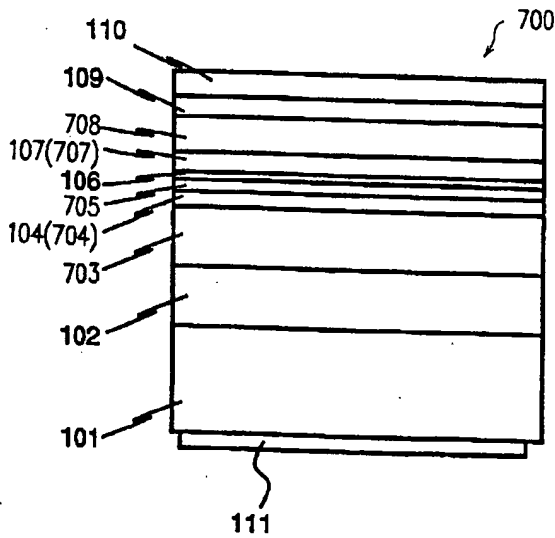
【図6】



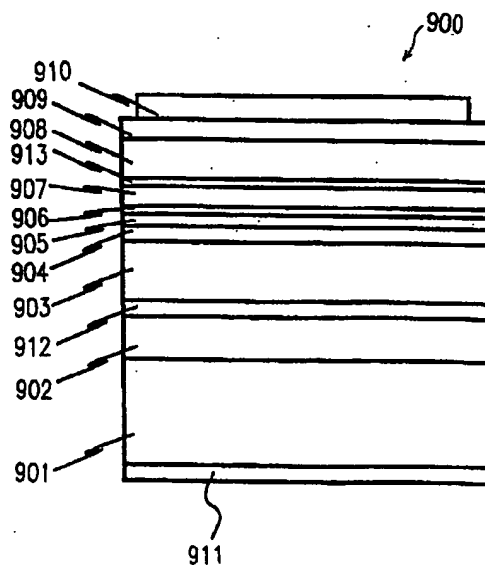
【図8】



【図7】

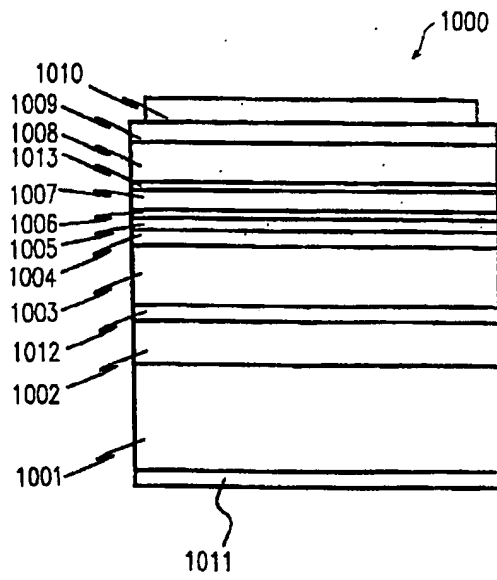


【図9】

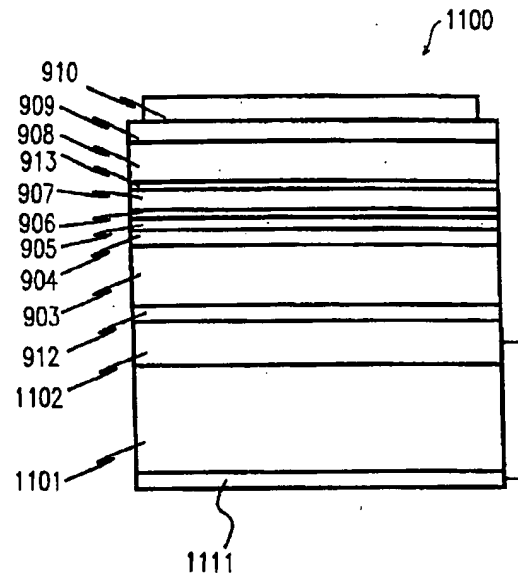


(18)

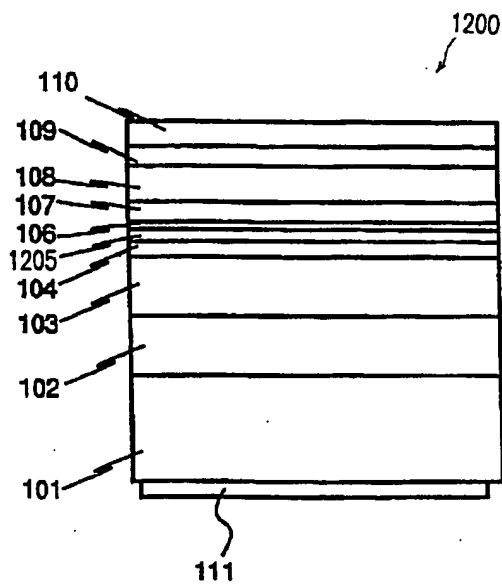
【図10】



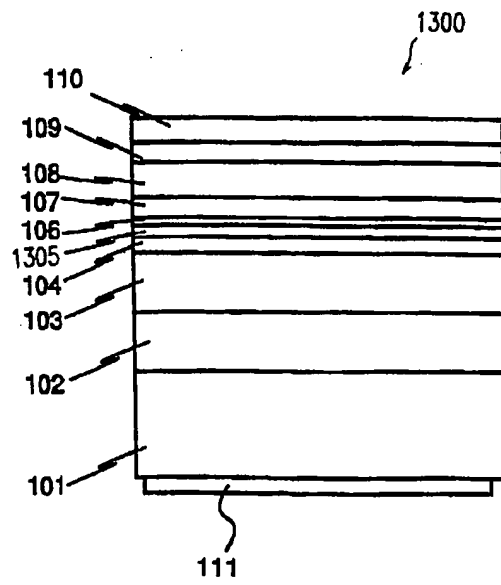
【図11】



【図12】

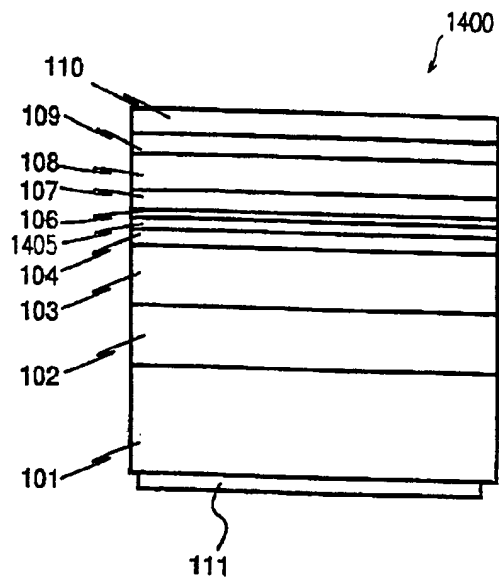


【図13】

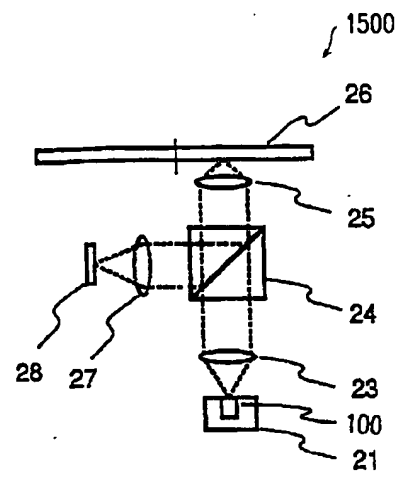


(19)

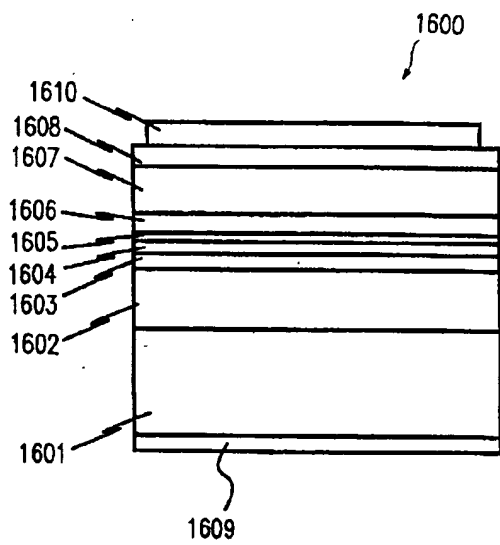
【図14】



【図15】



【図16】



【図17】

